

# **ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO TERMOMECAÁNICO DE UN SISTEMA DE REHABILITACIÓN PARA TUBERÍA DE TRANSPORTE DE GAS NATURAL**

**JOSÉ DAVID PÉREZ RUIZ**



**Universidad del Norte**  
**División de Ingenierías**  
**Maestría en Ingeniería Mecánica**  
**Barranquilla, Atlántico**  
**2017**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO TERMOMECAÁNICO DE UN SISTEMA DE  
REHABILITACIÓN PARA TUBERÍA DE TRANSPORTE DE GAS NATURAL**

**Ing. JOSÉ DAVID PÉREZ RUIZ**

**Tesis de maestría presentada como requisito para optar por el título de Magister en  
Ingeniería Mecánica**

**Director: JORGE BRIS, Ph.D.**

**Codirector: HERIBERTO MAURY, Ph.D.**

**Universidad del Norte**

**Facultad de Ingeniería**

**Maestría en Ingeniería Mecánica**

**Barranquilla, Atlántico**

**2017**

Este documento contiene información confidencial propiedad intelectual del Grupo de Investigación en Materiales, procesos y diseño (GYMIP) de la Universidad del Norte; se entrega a quien interese con el entendimiento que lo utilizará exclusivamente en la revisión y evaluación de su contenido y que lo mantendrá en forma confidencial, guardándolo contra inspección de terceras personas no autorizadas explícitamente por la Universidad del Norte.

Nota de aceptación:

-----  
-----  
-----  
-----

---

Presidente del Jurado

---

Jurado 1

---

Jurado 2

---

Jurado 3

---

**Vo.Bo. Director de la Investigación**  
Ing. JORGE BRIS, PhD.  
Dpto. De Ingeniería Mecánica – Universidad del Norte  
Barranquilla, 2017

## DEDICATORIA

*A Dios quien es fiel en sus promesas.*

*A mi papá José y mi mamá Elvira, quienes han estado de manera incondicional a mi lado, son mi mejor ejemplo y de los que estoy eternamente agradecido.*

*A mi amada y hermosa esposa Katherine, quien me impulsó a dar este paso y me ha apoyado todo este tiempo*

*A mis hijas melany, isa y kathe quienes han tenido que sacrificar muchas horas de ausencia de su papá para lograr este propósito*

## AGRADECIMIENTOS

*A DIOS primeramente*

*A mi tutor Jorge Bris y Co-tutor Heriberto Maury quienes han aportado su conocimiento y experiencia y me han permitido crecer profesionalmente.*

*A Promigas S.A.ESP por facilitar todo lo necesario para la financiación de esta investigación*

*Al profesor Carlos Arteta, su ayuda fue muy valiosa*

*A mi suegra Sofía Salazar quien ha estado al cuidado de mis hijas en gran parte del tiempo que la investigación me demandó*

*A todos los familiares y amigos que me han apoyado y aconsejado en este tiempo.*

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	15
1.1. PROBLEMÁTICA .....	16
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	17
1.3. RESULTADOS ESPERADOS .....	18
2. ESTADO DEL ARTE Y LA TÉCNICA .....	19
2.1. Métodos de rehabilitación de tubería .....	19
2.2. Resinas epóxicas.....	23
2.3. Análisis termomecánico de esfuerzos y desplazamientos en cilindros multicapa .....	29
3. OBJETIVOS.....	35
3.1. Objetivo General.....	35
3.2. Objetivos específicos. ....	35
4. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE RESINAS A DIFERENTES NIVELES DE TEMPERATURA.....	36
4.1. Metodología .....	36
4.1.1. Definición de materiales, procedimientos y equipos.....	36
4.1.1.1. Materiales.....	36
4.1.1.2. Procedimientos .....	39
4.1.1.3. Equipos .....	42
4.1.2. Desarrollo de pruebas de laboratorio y obtención de resultados .....	46
Resultados caracterización dureza resinas.....	46
Curva esfuerzo deformación sin acción de la temperatura .....	47
Curvas esfuerzo deformación con acción de la temperatura .....	47
4.1.3. Obtención de correlaciones matemáticas y análisis de resultados de la caracterización de resinas .....	49
4.2. Observaciones generales de la caracterización de resinas .....	52
5. DESARROLLO DE MODELOS ANALÍTICOS PARA EL CALCULO DE ESFUERZOS Y DESPLAZAMIENTOS EN SISTEMA DE CILINDROS MULTICAPA.....	53

5.1. Modelo analítico para el cálculo de esfuerzos en cilindros multicapa con variación del módulo de Young con la temperatura .....	53
5.2. Modelo analítico para el cálculo de esfuerzos en cilindro con módulo de elasticidad variable y efecto viscoelástico lineal (creep).....	63
6. ANALISIS DE RESULTADOS MODELOS ANALÍTICOS .....	69
6.1. Resultados análisis modelo analítico para el cálculo de esfuerzos en cilindros multicapa con variación del módulo de Young con la temperatura.....	69
6.1.1. Valoración general sistema de rehabilitación.....	69
6.1.2. Valoración esfuerzos y desplazamiento tubería transporte de gas .....	73
6.1.3. Valoración de esfuerzos y desplazamientos en refuerzo de resina epóxica	77
6.1.4. Mapas de esfuerzo en tubería según condiciones de operación, espesor del defecto y tipo de resina .....	80
6.2. Resultados análisis modelo analítico para el cálculo de esfuerzos en cilindros multicapa con variación del módulo de Young con la temperatura y consideración viscoelástica con efecto del tiempo .....	84
7. DESARROLLO DE PRUEBAS EXPERIMENTALES EN TUBERÍA .....	86
7.1. Metodología .....	86
7.1.1. Protocolo experimental.....	87
7.1.2. Construcción de banco de pruebas .....	87
7.1.3. Inicio de pruebas y monitoreo de variables.....	95
7.1.4. Análisis de resultados.....	96
7.2. Verificación del modelo analítico.....	100
7.2.1. Verificación con datos experimentales .....	100
7.2.2. Verificación por elementos finitos .....	102
8. CONCLUSIONES .....	105
9. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS POSTERIORES .....	107
10. REFERENCIAS.....	108
ANEXOS .....	112



## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Ventajas y desventajas del pulido (Grinding), tomado de [3]</i>	21
<i>Tabla 2. Ventajas y desventajas de la cubierta de compuesto, tomado de[3]</i>	23
<i>Tabla 3. Ventajas y desventajas del metal depositado por soldadura, tomado de [3]</i>	23
<i>Tabla 4. Resumen estado del arte modelos cálculo de esfuerzo en cilindros huecos y comparativo con modelos a desarrollar</i>	34
<i>Tabla 5. Sustancias que componen el SIKADUR 32</i>	37
<i>Tabla 6. Sustancias que componen el SIKADUR 301</i>	38
<i>Tabla 7. Sustancias que componen el LOCTITE PC 9462</i>	38
<i>Tabla 8. Dimensiones probeta tipo III</i>	40
<i>Tabla 9. Condiciones experimentales ensayo de tensión a temperaturas varias</i>	41
<i>Tabla 10. Condiciones experimentales ensayo dureza barcol</i>	42
<i>Tabla 11. Correlación matemática entre módulo de Young (E) y temperatura para varias resinas</i>	49
<i>Tabla 12. Expresiones experimentales y complementarias del modelo de cálculo de desplazamiento propuesto</i>	57
<i>Tabla 13. Propiedades mecánicas tubería de transporte gas</i>	69
<i>Tabla 14. Constantes térmicas y geométricas del sistema de rehabilitación utilizados en la evaluación</i>	69
<i>Tabla 15. Etapas principales del protocolo de pruebas hidrostáticas</i>	87
<i>Tabla 16. Condiciones presión temperatura para comparación entre modelo por elementos finitos y modelo analítico</i>	102

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Pasos generales de la metodología de investigación realizada .....	xiv
Figura 2. Falla en tubería por corrosión con tensión, tomado de [1] .....	17
Figura 3. Frecuencia de falla en tuberías de transporte de gas, tomado de [9] .....	18
Figura 4. Tubería de transporte de gas natural con defecto exterior por corrosión .....	19
Figura 5. Camisa de cierre de tipo A y de tipo B, tomado de [3] .....	21
Figura 6 . Detalle de la camisa tipo A en corte transversal .....	22
<b>Figura 7 .</b> Llenado de espacio entre camisa y tubería con resina epóxica. Tomado de [11] .....	22
Figura 8. Abrazaderas mecánicas, tomado de [3] .....	22
Figura 9. Comportamiento del coeficiente de expansión térmica por debajo y por encima de la temperatura de transición vítrea, tomado de [17] .....	24
Figura 10. Curvas esfuerzo deformación a temperatura ambiente y a 120°C con curado estándar, tomado de [17] .....	25
Figura 11. Curvas esfuerzo deformación a temperatura ambiente y a 120°C con poscurado a diferentes proporciones de agente de curado, tomado de [17] .....	25
Figura 12. Módulo elástico obtenido entre probetas con poscurado y curado estándar a varias concentraciones de agente de curado [17] .....	25
Figura 13. Variación del módulo de Young con diferentes porcentajes de agente de curado y velocidades de deformación en resinas epóxicas poscuradas a 100°C. tomado de [5] .....	26
Figura 14. Variación del módulo de Young con la temperatura y contenido de agente de curado, tomado de [5] .....	27
Figura 15. Esquema de cilindros multicapas, Tomado de [35] .....	29
Figura 16. Etapas principales en la metodología de caracterización de resinas .....	36
Figura 17. Aspectos utilizados para seleccionar las resinas .....	38
Figura 18. Procedimientos para la caracterización de las resinas .....	39
Figura 19. Esquema probeta tipo III. tomado de [48] .....	39
Figura 20. Pasos proceso de moldeo [48] .....	40
Figura 21. Acciones complementarias para prueba de tensión [48] .....	41
Figura 22. Molde para obtención de probetas .....	42
Figura 23. Equipo de adquisición de datos pacific instruments 6010U (izq) y controlador automax 5(der) ....	43
Figura 24. Detalle casquetes de radiación .....	43
Figura 25. Circuito de resistencias eléctricas por casquete .....	44
Figura 26. Brazo sujetador para casquete de radiación .....	44
Figura 27. Caja de control sistema de calentamiento por radiación .....	45
Figura 28. Máquina universal SOILTEST con sistema de calentamiento de probetas. ....	45
Figura 29. Verificación de calentamiento homogéneo en probetas .....	45
Figura 30. Durómetro Barcol impresor .....	46
Figura 31. Incremento de la dureza con el aumento del tiempo después de fraguado .....	46
Figura 32. Grafica comparativa Esfuerzo Vs deformación para diferentes tipos de resina epóxica a temperatura ambiente .....	47
Figura 33. Variación del módulo de Young respecto al aumento de temperatura .....	48
Figura 34. Variación del esfuerzo máximo respecto al aumento de temperatura .....	48
Figura 35. Curva de ajuste Temp-Módulo de Young para LOCTITE PC9462 .....	49
Figura 36. Esfuerzo máximo vs concentración de partículas de relleno en resina epóxica, tomado y modificado de [18] .....	51

Figura 37. Módulo de elasticidad Vs concentración de partículas de relleno en resina epóxica, tomado y modificado de [18] .....	51
Figura 38. Sistema de coordenadas cilíndricas y nomenclatura de esfuerzos, tomado de [38] .....	54
Figura 39. Curvas Módulo de elasticidad – temperatura con correlación matemática .....	58
Figura 40. Esquema, dimensiones y variables en cilindros multicapa .....	59
Figura 41. Esquema del modelo de Lamé .....	62
Figura 42. Modelo reológico del creep en estado estable con deformación elástica añadida, tomado de [54] .....	64
Figura 43. Esquema de deformaciones en modelo visco elástico propuesto. ....	65
Figura 44. Cambio de temperatura en dirección radial en el sistema de rehabilitación para rango en extremos de (320-301°K) .....	70
Figura 45. Variación del desplazamiento radial con el radio en el sistema de rehabilitación-resina Loctite PC 9462 (320-301°K) .....	71
Figura 46. Variación del desplazamiento radial con el radio en el sistema de rehabilitación-resina SIKADUR 301 (320-301°K) .....	71
Figura 47. Variación del desplazamiento radial con el radio en el sistema de rehabilitación-resina SIKADUR 32 (320-301°K) .....	72
Figura 48. Comparativo de la relación de distribución de esfuerzos tangenciales a lo largo del sistema de rehabilitación ante el uso de diferentes resinas como elemento de refuerzo (320-301°K) .....	72
Figura 49. Comparativo de la relación de distribución de esfuerzos radiales a lo largo del sistema de rehabilitación ante el uso de diferentes resinas como elemento de refuerzo (320-301°K) .....	73
Figura 50. Efecto del tipo de resina sobre la distribución de esfuerzos radiales en la tubería en comparación con un tubo sin camisa temperatura promedio de resina de 310°K .....	74
Figura 51. Efecto del tipo de resina sobre la distribución de esfuerzos radiales en la tubería en comparación con un tubo sin camisa con temperatura promedio de resina de 318°K .....	74
Figura 52. Efecto del tipo de resina sobre la distribución de esfuerzos tangenciales en la tubería en comparación con un tubo sin camisa con temperatura promedio de resina de 310°K .....	75
Figura 53. Efecto del tipo de resina sobre la distribución de esfuerzos tangenciales en la tubería en comparación con un tubo sin camisa con temperatura promedio de resina de 318°K .....	75
Figura 54. Efectividad del sistema de refuerzo Vs Temperatura del Gas .....	76
Figura 55. Detalle de la caída de temperatura por acción de la resistencia convectiva al interior de la tubería de gas natural .....	77
Figura 56. Comparativo de la variación radial del módulo de Young por efecto de la temperatura en diferentes resinas (320°K-301°K) .....	78
Figura 57. Comparativo de la variación del esfuerzo tangencial en diferentes resinas (320°K-301°K) .....	79
Figura 58. Comparativo de la variación del esfuerzo radial en diferentes resinas (320°K-301°K) .....	79
Figura 59. Comparativo del desplazamiento radial en las resinas estudiadas (320°K-301°K) .....	80
Figura 60. Mapa de esfuerzos equivalentes en tubería diámetro 10" según presión interna en tubería y temperatura de gas natural, con refuerzo de resina loctite PC 9462 .....	81
Figura 61. Mapa de esfuerzos equivalentes en tubería diámetro 10" según presión interna de tubería y temperatura de gas natural, con refuerzo de resina SIKADUR 301 .....	81
Figura 62. Mapa de esfuerzos equivalentes en tubería diámetro 10" según presión interna en tubería y temperatura de gas natural con refuerzo de resina SIKADUR 32 .....	82
Figura 63. Mapa de esfuerzos equivalentes en tubería según espesor de defecto y temperatura de gas natural, con resina Loctite PC 9462 .....	83
Figura 64. Mapa de esfuerzos equivalentes en tubería según espesor de defecto y temperatura de gas natural, con resina Loctite sikadur 301 .....	83
Figura 65. Mapa de esfuerzos equivalentes en tubería según espesor de defecto y temperatura de gas natural, con resina SIKADUR 32 .....	84

<i>Figura 66. Modelo del comportamiento en el tiempo del esfuerzo tangencial en tubería con resina sikadur como refuerzo.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 67. Esquema de probetas utilizadas durante el protocolo de pruebas hidrostáticas.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 68. Etapas generales de la metodología de pruebas experimentales en tubería.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 69. Probetas con refuerzo retiradas de la línea de transporte de gas.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 70. Instalación de conexiones y tuberías en probetas.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 71. Marcaje de puntos para instalación de galgas.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 72.presurización previa a 350 psi a y b.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 73.preparación superficial previa a la instalación de las galgas.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 74. Monitoreo espesor pared de tubería.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 75.limpieza previa a la instalación de galgas.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 76.instalación de galgas en puntos seleccionados.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 77.instalación de galgas en camisa.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 78. Armado de camisas.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 79.boquillas para llenado con resina.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 80.Encerramiento para banco de pruebas.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 81.montaje de probetas en piscina.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 82.instrumentación para medición de presión, temperatura y deformaciones.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 83.corrección de fugas.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 84.tarjetas de adquisición de datos.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 85.presurización a 850 psi.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 86.Variación de la temperatura durante la prueba.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 87.variación de la presión durante la prueba.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 88.configuración de galgas por probetas.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 89.Comportamiento esfuerzos en probetas 1 y 2.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 90.detalle posición galgas en probeta # 3.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 91.Comparación de esfuerzos en galgas 1,9 y 10.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 92.Comportamiento esfuerzos en probeta 3.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 93.Comportamiento esfuerzos en probetas 1 y 2.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 94.Comportamiento esfuerzos en probetas 1 y 2.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 95.Comportamiento esfuerzos en probetas 1 y 2.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 96. Cilindro multicapa modelado por elementos finitos.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 97.comparativo esfuerzos von mises en cilindro multicapa elementos finitos vs modelo (P0= 5.87 Mpa @35°C).....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 98.comparativo esfuerzos von mises en cilindro multicapa elementos finitos vs modelo (P0= 5.87 Mpa @50°C).....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 99.comparativo esfuerzos von mises en cilindro multicapa elementos finitos vs modelo (P0= 7 Mpa @50°C).....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 100.comparativo desplazamiento radial en cilindro multicapa –elementos finitos vs modelo (P0= 7 MPa @50°C).....</i>	<i>105</i>

## RESUMEN

El presente estudio busca determinar las posibles amenazas que puede recibir el sistema de rehabilitación de tubería actualmente utilizado por Promigas S.A ante aumentos de temperatura de la línea de transporte de gas natural. El capítulo 1 presenta una introducción acerca de la problemática presente en los sistemas de rehabilitación del tipo estudiado, la justificación de la presente investigación y los resultados esperados. El segundo capítulo presenta el marco teórico de los temas relacionados con la presente investigación y el estado del arte de los modelos analíticos para el cálculo de los esfuerzos y desplazamientos en sistemas de cilindro multicapa. El tercer capítulo presenta los objetivos propuestos en el presente trabajo de investigación. El cuarto capítulo expone el proceso de caracterización de las resinas utilizadas en el sistema de rehabilitación bajo la acción de temperatura incluyendo la metodología, la descripción de los equipos y los procedimientos utilizados y realizados. El quinto capítulo comprende el desarrollo de los modelos analíticos propuestos que permitan evaluar los esfuerzos a que se ven sometidos los diferentes elementos del sistema en mención. El sexto capítulo presenta el análisis de los resultados de los modelos analíticos. El capítulo siete expone todos los aspectos relacionados con la segunda etapa de experimentación correspondiente a los ensayos de pruebas hidrostáticas sobre probetas, la metodología utilizada, los equipos utilizados y técnicas empleadas; los resultados de las mediciones y el respectivo análisis de los resultados. Al final del capítulo siete se realiza una verificación de los resultados obtenidos experimentalmente, analíticamente y por elementos finitos. El presente trabajo finaliza con las observaciones, conclusiones y propuestas de investigación futuras, Destacándose que la temperatura es un factor significativo sobre la disminución de la efectividad de los sistemas de rehabilitación de camisa y que los modelos analíticos desarrollados predicen apropiadamente el comportamiento mecánico de los sistemas de rehabilitación bajo el efecto de temperatura, presión y variación del módulo de Young con la temperatura.

**Palabras clave:** Rehabilitación de tubería, Camisa, Resina epóxica, esfuerzos, integridad.



**Figura 1.** *Pasos generales de la metodología de investigación realizada*

## 1. INTRODUCCIÓN

Las tuberías de transporte de gas natural son elementos sujetos a corrosión como la mayoría de los metales [1] y es un hecho incuestionable la necesidad de garantizar su integridad y protección. Es por esto que hay muchos métodos que se han desarrollado para atender las necesidades de reparación por efecto de corrosión y pérdida de metal en tuberías de transporte de gas natural. Dentro de esos métodos algunos son invasivos y requieren del corte del paso de gas natural a través de la tubería para evitar explosiones y situaciones que comprometan la integridad del personal o la tubería, y los no invasivos que permiten que el flujo de gas no sea interrumpido lo cual es beneficioso desde un enfoque productivo, aunque vale aclarar que los métodos de rehabilitación no invasivos son aplicables cuando el defecto tiene una profundidad que aun permite rehabilitación de este tipo[2]. Dentro de los métodos de rehabilitación no invasivos se encuentra el del tipo de refuerzo con camisa[3]. Este método consta de una camisa metálica que se instala de manera externa sobre el segmento de la tubería afectada con el fin de que la camisa reciba parte de los esfuerzos radiales y tangenciales que produce la presión interna y se disminuyan así los esfuerzos tangenciales y radiales que inciden sobre la tubería de gas en la zona del defecto. Sin embargo en vista de que la zona del defecto consta de menor espesor por el material perdido por la corrosión se hace necesario el uso de materiales de relleno entre la tubería y la camisa que transfieran carga desde el tubo hacia la camisa y de esta manera lograr el objetivo de aliviar esfuerzos en la zona del defecto. Las resinas epóxicas son materiales utilizados como relleno especialmente gracias a sus buenas propiedades mecánicas a temperatura ambiente y conformabilidad[4], lo que facilita que llenen los espacios entre camisa y tubería.

Las condiciones de producción y transporte de gas requieren de eventos en que hay aumentos de presión y temperatura lo cual puede generar efectos en los sistemas de rehabilitación en especial en la resina epóxica y de paso en la tubería. Hay estudios que muestran el efecto de la temperatura sobre las propiedades mecánicas de las resinas epóxicas. Yamini et al.[5] probaron las propiedades de resinas mecánicas con poscurado encontrando que hay importantes variaciones en el módulo de Young con la temperatura y con la concentración de endurecedor. Chiguma et al[6] han estudiado el efecto de la temperatura sobre las propiedades térmicas de las resinas con relleno de nano compuesto, encontrándose importantes variaciones en conductividad térmica, calor específico y difusividad térmica entre otros.

El presente trabajo comprende el estudio del comportamiento mecánico de los diferentes componentes estructurales de un sistema de rehabilitación (camisa de cierre tipo A), evaluados a diferentes niveles de temperatura, y por otra parte el desarrollo de modelos analíticos y computacionales para predecir dicho comportamiento. Finalmente se pretende

hacer una validación de los modelos analíticos con datos experimentales realizados sobre tramos de tubería sometidos a condiciones de operación.

### **1.1. PROBLEMÁTICA**

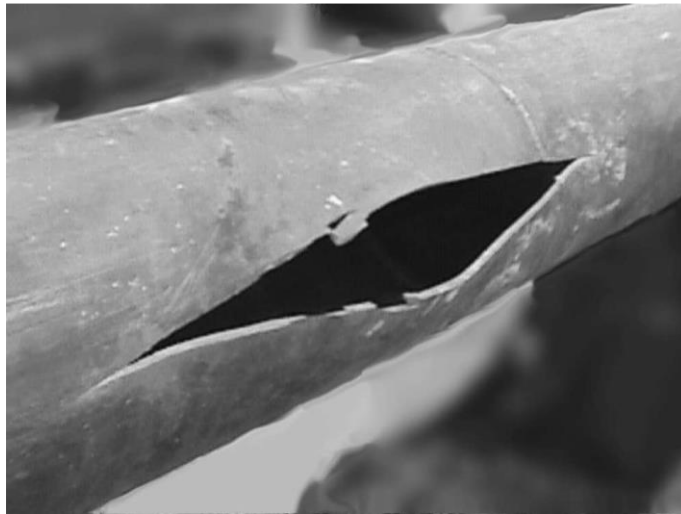
Los procedimientos de inspección de Promigas S.A permiten determinar ciertos niveles de afectación en la tubería de gas natural a causa de la corrosión o abolladuras. Históricamente muchas secciones de tubería han sido reparadas con el sistema de camisa de cierre tipo A. Este sistema consta de una camisa metálica que se coloca en la zona externa al defecto. Entre la camisa y la tubería se vierte una resina epóxica la cual funciona como interfase nivelatoria entre el tubo de transporte de gas natural y la camisa.

Por razones de operación y producción, Promigas S.A requiere del aumento de la presión al interior de la tubería de transporte de gas natural, este aumento de presión viene acompañado de aumentos de temperatura en el gas transportado cerca de 77°F. A su vez el aumento de la temperatura produce disminución significativa en la rigidez de la resina epóxica lo cual da paso a una disminución en la transmisión de los esfuerzos hacia la camisa externa y por ende un aumento en los esfuerzos de la tubería de transporte de gas natural. Las presiones de la línea de transporte de gas natural oscilan entre 650 psi y 850 psi en condiciones normales de operación. Es de vital importancia entonces realizar una verificación acerca del comportamiento de los esfuerzos en tubería, refuerzo y camisa externa ante varios escenarios de presión y temperatura con el fin de predecir comportamientos y ofrecer la confiabilidad de la integridad en la línea por medio de la validación del método actual o posible cambio del método de rehabilitación o selección de nuevos tipos de resina epóxica o material compuesto que brinde las características mínimas de rigidez y disminución de esfuerzos en la tubería de transporte de gas natural.



## 1.2. JUSTIFICACIÓN

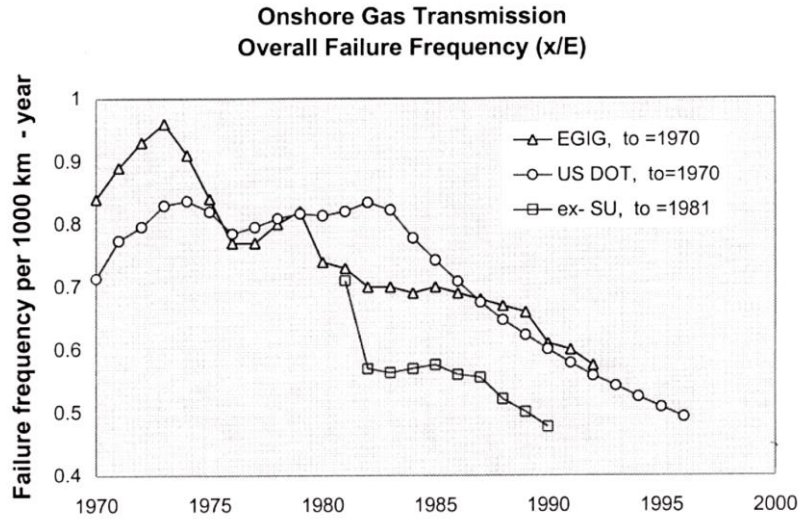
Las fallas en tubería de gas se pueden clasificar de manera general como instantáneas y dependientes del tiempo. Las fallas dependientes del tiempo están asociadas con mecanismos de crecimiento de fisuras por fatiga y creep, corrosión bajo tensión, u otras formas de corrosión, y desgaste. Las juntas soldadas son particularmente susceptibles a fatiga, la cual se inicia típicamente en discontinuidades del cordón. La Figura 1 muestra la fractura ocurrida en una tubería debido a corrosión bajo tensión.[7]



**Figura 2.** *Falla en tubería por corrosión con tensión, tomado de[1]*

los accidentes debidos a daños en tuberías de gas por corrosión se han disminuido con el paso del tiempo, con índices de 1524 accidentes al año en 1980 a unos 256 casos en el 2014 según el bureau de estadísticas de transporte[8]. Sin embargo esta cifra no deja de ser preocupante más cuando se tiene en cuenta que esos datos solo son para los estados unidos. Es por esto que cualquier aporte que permita minimizar el índice de incidentes por explosión de tuberías por corrosión o desgaste siempre será importante.

La figura siguiente permite ver una importante reducción de los accidentes entre 1970 y 1999. Estos datos han sido recopilados para diferentes sistemas de tuberías a nivel mundial, US DOT: United States Department of Transportation, EGIG: European Gas pipeline Incident Group y CONCAWE: Conservation of Clean Air and Water in Europe. Sin embargo, en los últimos años (2000-2005) se ha podido observar un ligero incremento en el número de accidentes[7].



**Figura 3.** Frecuencia de falla en tuberías de transporte de gas, tomado de [9]

El presente estudio está alineado con la necesidad de disminuir los índices de accidentalidad en tuberías de gas natural por medio de la evaluación y modelación de esfuerzos en sistemas cilíndricos multicapa con refuerzo epóxico al someterse a presión y temperatura. Por medio de los resultados analíticos, de elementos finitos y experimentales se busca definir la viabilidad y pertinencia de los sistemas de rehabilitación refuerzos de resina epóxica como alternativa de reparación de tuberías de gas dentro del marco de los sistemas de rehabilitación de tubería del tipo no metálico y adhesivo [2].

### 1.3. RESULTADOS ESPERADOS

Como resultados esperados se plantearon los siguientes:

- Obtener información precisa y confiable que facilite la evaluación de la pertinencia y confiabilidad de los sistemas de rehabilitación de tubería de gas natural utilizados por Promigas S.A E.S.P.
- Obtención de mapas de presión, temperatura y esfuerzo en tuberías que permitan evaluar la criticidad de los defectos y facilitar la toma de decisiones acerca del método de rehabilitación apropiado.
- Desarrollo de modelos analíticos que permitan realizar análisis, diseños y cálculos en sistemas de cilindro multicapa no homogéneos en función de la presión y temperatura.
- Generación de modelos matemáticos que midan el efecto del creep en los materiales del sistema de cilindros multicapa sobre el aumento en las deformaciones y esfuerzos.
- Sentar las bases para futuras investigaciones con nuevos tipos de resinas epóxicas con rellenos para formación de compuestos más resistentes.
- Divulgación de los resultados obtenidos en eventos nacionales y/o internacionales.

## 2. ESTADO DEL ARTE Y LA TÉCNICA

### 2.1. Métodos de rehabilitación de tubería

Las tuberías de gas frecuentemente sufren pérdidas de metal debido a corrosión y a erosión, afectándose su integridad y vida útil. Existen muchos tipos de opciones de reparación, algunas de estas reparaciones requieren que el flujo de la tubería sea suspendido mientras se realizan las labores de reparación y en otros casos las reparaciones son menos invasivas y permiten que la tubería funcione de manera normal mientras se adelantan las labores de reparación.



**Figura 4.** Tubería de transporte de gas natural con defecto exterior por corrosión

Instituciones como ASME [2] han desarrollado múltiples investigaciones y normas para la reparación de tuberías de gas y han organizado las reparaciones en 3 grandes grupos:

- Reparaciones soldadas
- Reparaciones mecánicas
- Reparaciones no metálicas y adhesivas

Las reparaciones soldadas exigen que la tubería suspenda el paso de gas ya que por requerir soldadura a tope se hace necesario realizar un corte redondeado o rectangular según sea el caso. Las reparaciones mecánicas hacen referencia principalmente a los componentes tales

como bridas, pernos y otros elementos similares. Las reparaciones no metálicas y adhesivas se refieren principalmente a aplicaciones de alto riesgo.

Las reparaciones no metálicas y adhesivas son muy útiles en sistemas que transportan fluidos tales como tuberías, tanques y recipientes. Los sistemas de reparación de este tipo [1] están compuestos normalmente de:

- Substrato(componente)
- Preparación de superficie
- Material compuesto o similar
- Material de transferencia de carga
- Adhesivo de capa primer
- Método de aplicación
- Protocolo de curado
- Adhesivo interlaminar para sistemas de reparación que utilizan láminas precurvadas

A continuación se presentan las técnicas principales que se utilizan para rehabilitar secciones de tubería sin interrupción en el servicio. Según Farrag[10], tenemos:

- Pulido(Grinding)
- camisa de cierre metálica (Full Encirclement Sleeve)
- Abrazaderas mecánicas(Mechanical clamp)
- Cubierta de compuesto(Composite Wrap)
- Depósito de material soldado(Deposited Weld metal)
- Parche(Patch)
- Hot tapping

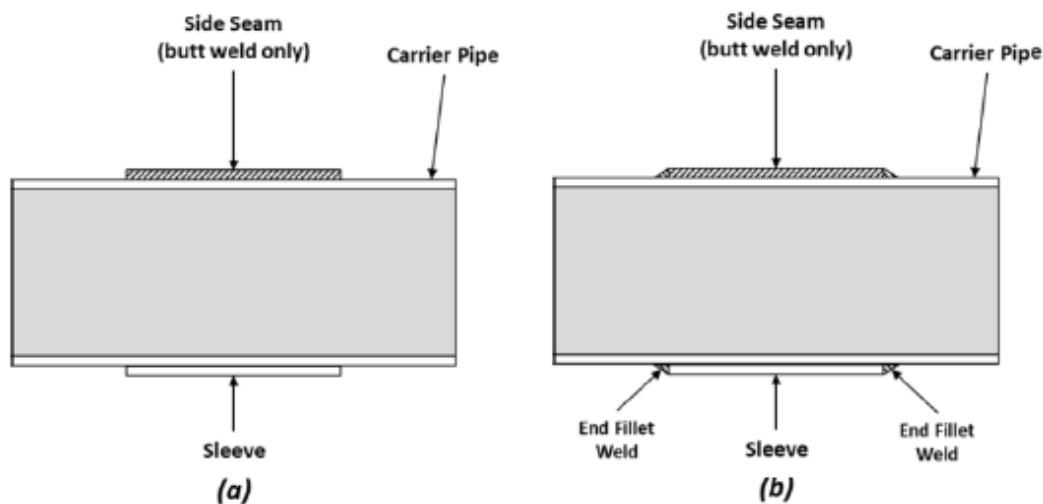
La aplicación de cada método depende del tipo de falla y condiciones de operación a las que se expone la tubería.

La técnica del pulido (Grinding) es una técnica que consiste en la remoción de imperfecciones de la tubería y posterior protección contra la corrosión. Algunas ventajas y desventajas se exponen en la tabla 1.

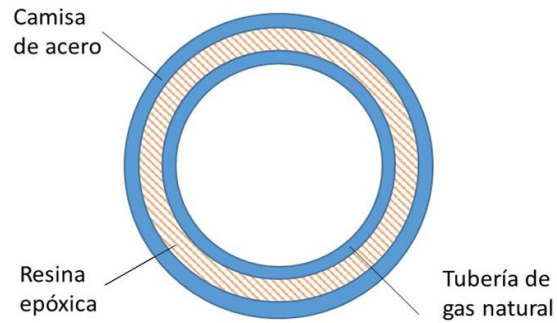
PULIDO(Grinding)	
Ventajas	Desventajas
Procedimiento rápido	La presión debe disminuirse
Bajo costo	Limitación en el tamaño de los defectos
No requiere personal altamente especializado	Solo para defectos externos
Puede utilizarse en conjunto con otras técnicas	Requiere de inspección adicional por tintas penetrantes o partículas magnéticas

**Tabla 1.** Ventajas y desventajas del pulido (Grinding), tomado de [3]

Cuando la tubería presenta signos de desgaste o deterioro severos se recomienda usar la técnica de la camisa de cierre total, en la cual una camisa de acero compuesta por dos tapas se localiza alrededor de la tubería y se unen longitudinalmente las tapas por medio de soldadura. Las del tipo A no se sueldan a la tubería y no manejan presión, mientras que la tipo B son soldadas a la tubería y son usadas para reparar fugas o defectos. La figura 1 permite ver ambos tipos. El espacio comprendido entre tubería y camisa usualmente se llena con resina epóxica tal como se aprecia en la figura 7.



**Figura 5.** Camisa de cierre de tipo A y de tipo B, tomado de [3]

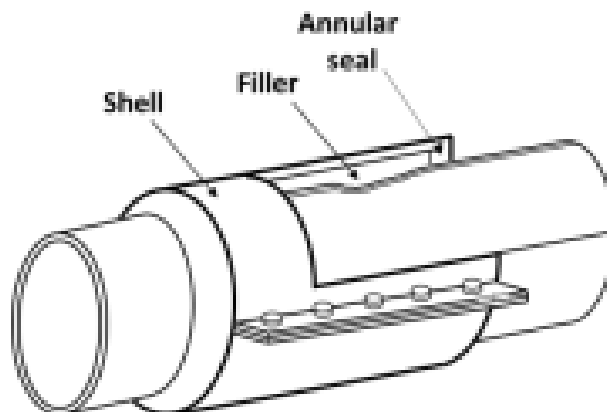


**Figura 6 . Detalle de la camisa tipo A en corte transversal**



**Figura 7 . Llenado de espacio entre camisa y tubería con resina epóxica. Tomado de [11]**

El método de las abrazaderas mecánicas consiste de dos tapas que se unen por medio de elementos mecánicos de fijación. Suele utilizarse esta técnica para generar fuerza de compresión en la tubería y prevenir crecimiento de grietas en tuberías.



**Figura 8. Abrazaderas mecánicas, tomado de[3]**

Las cubiertas de material compuesto (Composite Wraps) han sido utilizadas extensivamente en la industria naval y de construcción. Es un método de fácil instalación y permite continuar el transporte de gas por la tubería sin inconvenientes. En la tabla 2 se aprecian algunas ventajas y desventajas de este método.

<b>CUBIERTA DE MATERIAL COMPUESTO(COMPOSITE WRAP)</b>	
<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
Pueden ser usadas en secciones rectas, curvas o accesorios	No pueden ser utilizadas para reparar fugas
Instalación rápida o secciones curvas	Debe aplicarse tensión al refuerzo durante la instalación
Bajos costos de intervención	Se requiere prueba de perdida de adhesión catódica previa
Se requiere personal con menor entrenamiento que con las técnicas que utilizan soldadura	Limitaciones en temperaturas de operación
	El almacenamiento, transporte, y el manejo de los materiales debe hacerse bajo estrictas condiciones
	Se requiere preparación previa de la superficie

**Tabla 2.** Ventajas y desventajas de la cubierta de compuesto, tomado de[3]

El método de la deposición de soldadura metálica busca restaurar la tubería por medio de la aplicación de soldadura en la superficie. Las ventajas y desventajas se resumen en la tabla 3.

<b>METAL DEPOSITADO POR SOLDADURA</b>	
<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
Adaptable a secciones curvas o accesorios	No puede utilizarse para reparar fugas
Rápida rehabilitación	Se requiere personal altamente entrenado
Solo requiere de material de relleno como entrada	Riesgo de penetración en la tubería(espesor mínimo requerido de 3.2 mm)
	Posibles cambios micro estructurales en la tubería

**Tabla 3.** Ventajas y desventajas del metal depositado por soldadura, tomado de [3]

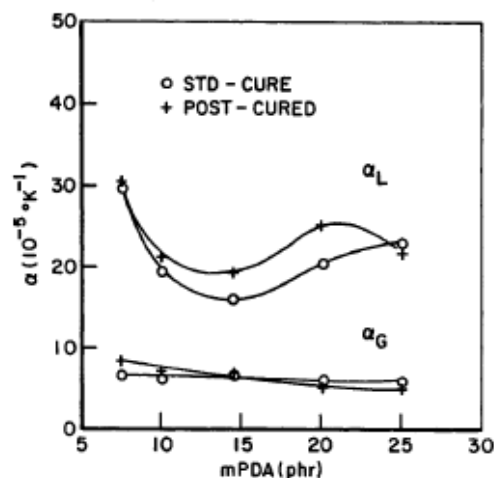
## **2.2. Resinas epóxicas**

Las resinas son materiales de gran utilidad, sin embargo en ocasiones sus propiedades son limitadas para cierto tipo de aplicaciones, es por eso que los materiales compuestos son

ampliamente utilizados hoy y tienen gran importancia en reemplazar incluso el uso de metales gracias a su bajo peso, Resistencia a la corrosión, rigidez relativa y resistencia. Algunas de las resinas más utilizadas son: poliéster, vinil Ester, epóxicas, poliamida, fenólicas, nylon, entre otras[12].

Las resinas epoxi son ahora ampliamente utilizadas en aplicaciones estructurales. A menudo se utilizan como adhesivos o materiales de matriz para materiales compuestos y debido a las aplicaciones estructurales la predicción de la resistencia de tales componentes es de vital importancia. Tales predicciones se realizan normalmente usando la mecánica de fractura elástico lineal[13]. Chakrabarty et al.[14] Caracterizaron las propiedades mecánicas, térmicas y morfológicas de la resina epóxica basada en etil metacrilato encontrando decrecimiento gradual del módulo de elasticidad y resistencia mecánica con el incremento de la elongación en rotura y tenacidad al incrementar el contenido de PEMA (Polietilmetacrilato).

Un aspecto muy importante en la aplicación de resinas epóxicas es el curado y de manera especial el agente de curado utilizado y su proporción respecto a la resina epóxica pura. Apicella et al.[15] Estudiaron el sistema DGEBA/TETA en condiciones de poscurado a diferentes temperaturas y test mecánicos encontrando que el tratamiento térmico de la resina epóxica que contenía agua afecta sus características de absorción de agua, su módulo elástico y temperatura de transición vítrea. Es conocido también que para determinadas composiciones, el esfuerzo de fluencia y el módulo de elasticidad disminuyen con la cantidad de agente de curado, y aumentan con la disminución de la temperatura. La benzoxazina es utilizada como endurecedor de la resina epóxica y garantiza buena resistencia al calor, resistencia al agua, aislamiento eléctrico y propiedades mecánicas similares a las propiedades que se tienen cuando la resina epóxica es curada con bisphenol A[16]. El módulo de elasticidad y otras propiedades a tensión de las resinas epóxicas están predominantemente relacionados con un empaque intermolecular, se aprecia también que el módulo de elasticidad disminuye considerablemente con el aumento de la fracción de agente de curado[17].



**Figura 9.** Comportamiento del coeficiente de expansión térmica por debajo y por encima de la temperatura de transición vítrea, tomado de [17]



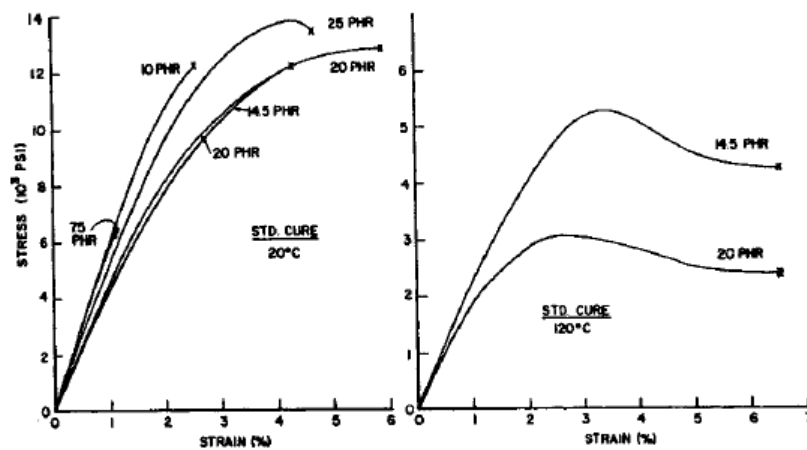


Figura 10. Curvas esfuerzo deformación a temperatura ambiente y a 120°C con curado estándar, tomado de [17]

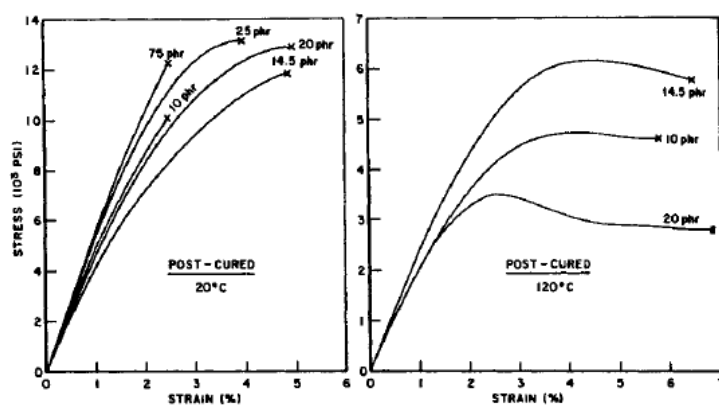


Figura 11. Curvas esfuerzo deformación a temperatura ambiente y a 120°C con poscurado a diferentes proporciones de agente de curado, tomado de [17]

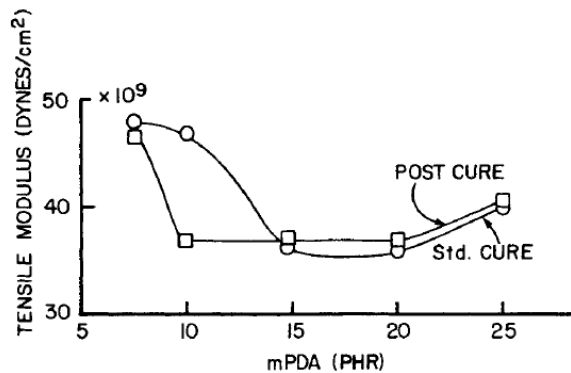
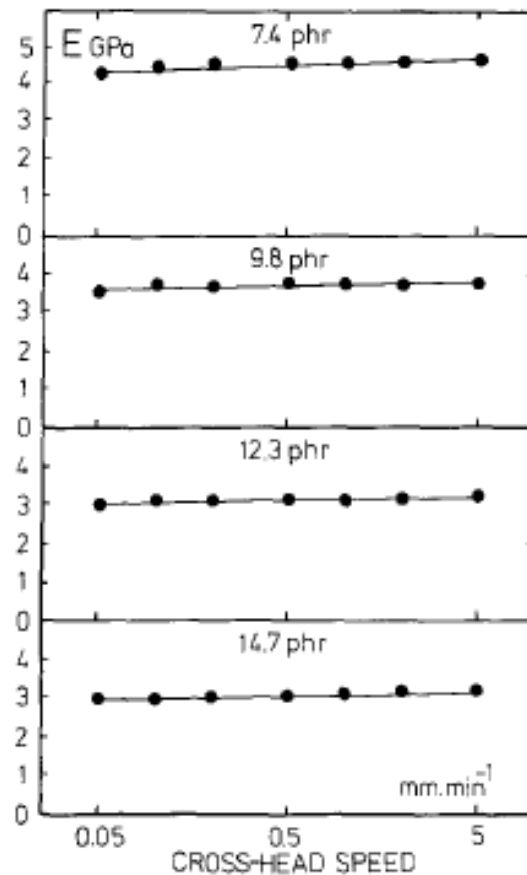


Figura 12. Módulo elástico obtenido entre probetas con poscurado y curado estándar a varias concentraciones de agente de curado[17]

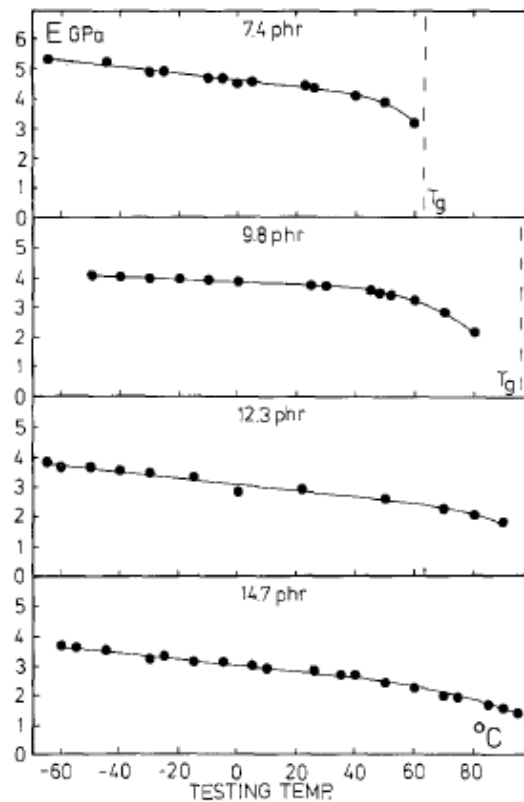
el proceso de poscurado tiene implicaciones importantes sobre las propiedades mecánicas en las resinas epóxicas, propiedades tales como la resistencia a tensión, el módulo de elasticidad, rata de deformación, tenacidad y resistencia al impacto muestran máximos valores con procesos de poscurado a 120°C durante 4 horas[18].

Richeton et al.[19] Estudió el efecto de la temperatura y la rata de deformación sobre el comportamiento mecánico de 3 polímeros amorfos encontrando una influencia muy fuerte sobre la respuesta mecánica, en particular el hecho de que el esfuerzo de fluencia se incrementa con la disminución de la temperatura y con el incremento de la velocidad de deformación.

El módulo de elasticidad de la resina epóxica tiene una relación lineal con la temperatura a valores lejanos de la temperatura de transición vítrea y no lineal cerca de ella siendo muy importante la influencia de la velocidad de deformación utilizada cuando hay proceso de poscurado[5].



**Figura 13.** Variación del módulo de Young con diferentes porcentajes de agente de curado y velocidades de deformación en resinas epóxicas poscuradas a 100°C. tomado de [5]



**Figura 14.** Variación del módulo de Young con la temperatura y contenido de agente de curado, tomado de [5]

Las resinas epóxicas han sido utilizadas como matrices en materiales compuestos de manera amplia, en ocasiones como compuestos formados con material de relleno y en otras con fibra de vidrio o carbono u otros tipos, gopinath et al experimentaron con fibra de jute y con matrices de resina epóxica y resina poliéster presentando mejores propiedades mecánicas los compuestos con matriz epóxica[20].

Las mejora de las propiedades mecánicas de las resinas epóxicas es un tema de alto interés y hay mucha investigación que se ha realizado al respecto, es por esto que el desarrollo de compuestos a partir de resina epóxica incluye el desarrollo a partir de material de relleno del tipo granulado. Palumbo et al [21] estudiaron las propiedades mecánicas de resinas epóxicas con relleno de microesferas de vidrio huecas estableciendo que modelos existentes como el de Lewis and nielsen para la estimación del módulo de Young sobreestiman el valor del módulo hallado experimentalmente cuando se utilizan fracciones de relleno mayores a 0.1. Hussain et al.[22] Estudió diferentes técnicas para fabricar compuestos epóxicos encontrando que solo la técnica de fresado en húmedo (wet ball-milling) es efectiva en la dispersión de partículas

cerámicas de forma homogénea garantizando que las propiedades mecánicas son bastante buenas.

Muchos materiales de origen cerámico han sido introducidos en matrices de resinas epóxicas con el fin de mejorar ciertas propiedades mecánicas del material compuesto y es por eso que el quartz o silica ( $\text{CaCO}_3$ ) aparece como una opción bastante difundida el día de hoy, en especial en tamaño de nanopartículas. Trostyanskaya[23] estudió el efecto del uso de quartz y polvo de aluminio-borosilicato en concentraciones desde 0 a 0.413 sobre el módulo de elasticidad y las propiedades térmicas de resinas epoxicas curadas con polietilenpoliamina. Concluyendo que la introducción de ese relleno en resina causa un cambio en la estructura de la cadena polimérica determinado por la interacción de la interfase en el contorno del relleno y la concentración del relleno. Por la interacción molecular en la matriz del plástico se incrementa la resistencia también. El incremento del contenido de nanopartículas de  $\text{CaCO}_3$  no aumenta significativamente la temperatura de transición vítrea, pero si aumenta linealmente la densidad. Los compuestos de resina epóxica con relleno de  $\text{CaCO}_3$  también muestran una estabilidad térmica mayor que la de la resina pura, lo cual puede explicarse con el incremento de la superficie de contacto entre las partículas de  $\text{CaCO}_3$  con la matriz de resina[24].

No solo la resina epóxica presenta mejoras con la adición de partículas de silica. Ahmed y Jones[25] desarrollaron un modelo de esfuerzos residuales que muestra como la resina de poliéster aumenta su módulo de elasticidad con la presencia de relleno de silicio, esto gracias a la presencia de una adhesión de la interfase matriz-partícula.

Abenojar et al. [26]Estudiaron la influencia que la adición de nano silica tiene sobre las propiedades mecánicas, desgaste y erosión por cavitación, propiedades térmicas y reacción de curado, encontrando que la resistencia a la cavitación, fue más alta con la adición de nanosilica que con resina pura, Pero las propiedades mecánicas son afectadas pues disminuye la dureza, la resistencia mecánica y el módulo de Young. Bray et al. [27]desarrollaron modelos para predecir tenacidad en los compuestos de resina epóxica con relleno de silica en función de la fracción en volumen y el tamaño de la partícula, encontrando que hay una relación importante entre el incremento de la tenacidad con el incremento de la concentración de nanopartículas pero no hay efecto significativo en el tamaño de la partícula con el aumento de la tenacidad, el módulo de elasticidad tiene el mismo comportamiento respecto al aumento de la concentración de silica.

La alúmina es una alternativa importante como relleno y ha demostrado que ofrece rendimientos en la conformación de materiales compuestos con matrices epóxicas. compuestos con alúmina tienen mejor módulo de elasticidad que los compuestos con silica como relleno para porciones equivalentes de peso[28].

Jiang et al,[29] Estudiaron los comportamientos termo mecánicos de las resinas epóxicas con relleno de partículas nano de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  hallando que la estabilidad térmica es muy similar a la de

la resina pura, la temperatura de transición vítrea es 11°C superior al de la resina pura y el coeficiente de expansión térmica decrece con el incremento de las partículas nano de  $Al_2O_3$

Pese a que la alúmina y la silica son buenos materiales de relleno la literatura existente muestra que no son los que ofrecen el mejor desempeño. se destaca el óxido de zinc como uno de los mejores rellenos, esto en vista de que su uso permite mejorar en un 24% el esfuerzo máximo, en un 47% el módulo de elasticidad, la resistencia a la compresión en un 48%, el esfuerzo a flexión en un 44 % y el módulo a flexión en un 77% con respecto a la matriz pura[30].

### 2.3. Análisis termomecánico de esfuerzos y desplazamientos en cilindros multicapa

Los recipientes axisimétricos tienen amplia aplicación en la industria e incluyen tuberías, tanques entre otros. Algunas aplicaciones están relacionadas con el confinamiento de fluidos como es el caso de tanques y tuberías, y otras aplicaciones hacen parte del ajuste mecánico de ejes con poleas o discos entre otros.

Las tuberías son cilindros que tienen amplia utilización en la industria hoy en día y las aplicaciones son incontables. Los cilindros son clasificados en dos grandes grupos[31], los de pared delgada y los de pared gruesa encontrándose una simplificación significativa en los cálculos de esfuerzo en los cilindros de pared delgada en relación con los de pared gruesa. Los cilindros de pared gruesa fueron ampliamente estudiados por Lamé[32], Estableciéndose que si la presión interna del fluido se aproxima al límite de esfuerzo del material, el cilindro podría explotar. Con el fin de evitar este tipo de problema se recomiendan los cilindros compuestos[33].

Los cilindros compuestos están conformados por dos o más cilindros los cuales son necesariamente axisimétricos. Algunos tienen todas las capas del mismo material y otros de diferentes materiales. Se hace muy útil el estudio de este tipo de cilindros en aplicaciones de alta presión interna[34].

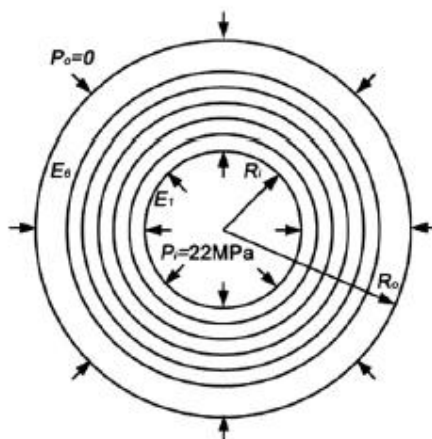


Figura 15. Esquema de cilindros multicapas, Tomado de [35]

El cálculo de los esfuerzos en cilindros compuestos ha sido ampliamente estudiado para cilindros de dos capas de metal y de más capas inclusive con la acción de calor y presencia de esfuerzos térmicos[36]. Dentro de los cilindros multicapas hay varias configuraciones y condiciones del material que hacen que cada caso deba atenderse de manera particular, las combinaciones posibles más comunes se definen a continuación:

- Cilindros del mismo material de material isotrópico y homogéneo
- Cilindros de diferentes materiales de materiales isotrópicos y homogéneos
- Cilindros del mismo material de materiales isotrópicos y no homogéneos
- Cilindros del mismo material de materiales no isotrópicos y no homogéneos
- Cilindros de diferentes materiales con segmentos isotrópicos no homogéneos
- Cilindros de diferentes materiales con segmentos no isotrópicos y no homogéneos

Margetson et al [37] desarrollaron modelos para determinar los esfuerzos y probabilidades de falla en cilindros transversalmente isotrópicos hechos con materiales frágiles bajo la acción de presión y gradiente de temperatura radial, adicional al caso isotrópico se analizaron casos con diferentes grados de anisotropía incluyendo los casos de tipos fibrosos y laminares. Las expresiones para el cálculo de los esfuerzos radiales, tangenciales y longitudinales en el caso isotrópico son las siguientes:

$$\sigma_r = C_1(A_{11} + A_{12}) - \frac{C_2}{r}(A_{11} - A_{12}) - \frac{\beta_r(A_{11}-A_{12})}{r^2 A_{11}} \int_{R_i}^r rT(r) dr \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = C_1(A_{11} + A_{12}) - \frac{C_2}{r^2}(A_{11} - A_{12}) + \frac{\beta_r(A_{11}-A_{12})}{r^2 A_{11}} \int_{R_i}^r rT(r) dr - \frac{\beta_r(A_{11}-A_{12})T(r)}{A_{11}} \quad (2)$$

$$\sigma_z = \left( \frac{A_{13}\beta_r}{A_{11}} - \beta_z \right) T(r) - \frac{2}{R_0^2 - R_i^2} \int_{R_i}^{R_0} \left( \frac{A_{13}}{A_{11}} - \beta_z \right) rT(r) dr \quad (3)$$

$$A_{11} = A_{22} = \frac{E_t}{D} \left( 1 - \frac{E_z}{E_t} \nu_{zt}^2 \right) \quad (4)$$

$$A_{23} = A_{13} = \frac{E_z}{D} (\nu_{zt} + \nu_{tt}\nu_{zt}) \quad (5)$$

$$A_{12} = \frac{E_t}{D} (\nu_{tt} - \frac{E_z}{E_t} \nu_{zt}^2) \quad (6)$$

$$A_{33} = \frac{E_z}{D} (1 - \nu_{tt}^2) \quad (7)$$

$$\beta_r = A_{11}\alpha_t + A_{12}\alpha_t + A_{13}\alpha_z \quad (8)$$

$$\beta_\theta = A_{12}\alpha_t + A_{22}\alpha_t + A_{23}\alpha_z \quad (9)$$

$$\beta_z = A_{13}\alpha_t + A_{23}\alpha_t + A_{33}\alpha_z \quad (10)$$

Sollund et.al [38] definieron soluciones analíticas para el cálculo de desplazamientos y esfuerzos en cilindros multicapas sujetos a presión y carga térmica con la novedad de que comparan el caso de temperatura constante a lo largo del radio de los cilindros con el caso de temperatura variable alrededor del radio de los cilindros, con amplio uso en tuberías mar adentro con capas adicionales para protección de la corrosión. El modelo es un algoritmo que se basa en la teoría de lamé y aplica para el cálculo de esfuerzos y desplazamientos en n capas cilíndricas.

$$\sigma_{rr,i}(r_{i-1}) = -q_{i-1} \rightarrow \frac{A_i}{r_{i-1}^2} + C_i - \frac{l_i(r_{i-1})}{\delta_i} = \frac{A_i}{r_{i-1}^2} + C_i = -q_{i-1} \quad (11)$$

$$\sigma_{rr,i+1}(r_{i+1}) = -q_{i+1} \rightarrow \frac{A_{i+1}}{r_{i+1}^2} + C_{i+1} - \frac{l_{i+1}(r_{i+1})}{\delta_{i+1}} = -q_{i+1} \quad (12)$$

Donde A y C son constantes de lamé en función del módulo de elasticidad, el módulo de poisson y la constante de expansión térmica.

Otro caso importante es el de los sistemas de cilindros multicapa con efecto de carga axial, en este caso Vedeld et al. [39] han desarrollado soluciones analíticas para el desplazamiento y esfuerzo en cilindros multicapa sujetos a presión y carga térmica, incluyendo el efecto de carga axial con simplificación de resorte en sentido axial. Las soluciones obtenidas son de fácil implementación en aplicaciones de ingeniería. Adicional a estos casos otro punto importante que se ha investigado es el de los espesores óptimos y características apropiadas de auto fricción en cilindros compuestos. En este tema Bahoum et al.[40] Han estudiado los efectos mecánicos y térmicos en cilindros compuestos con el fin de optimizar características relacionadas con el espesor de la tubería, auto fricción entre otros. Los resultados son comparados con modelos de elementos finitos. En el estudio de Bahoum el módulo de elasticidad es asumido constante.

Se han desarrollado también soluciones generalizadas para sistemas de múltiples capas entre los que se destaca el trabajo de Zhang et al. [35] quienes desarrollaron soluciones analíticas para determinar distribución de esfuerzos en cilindros multicapas de material bajo presión interna y cargas térmicas, Incluyeron también el efecto de extremos cerrados sobre la distribución de esfuerzos. Los modelos obtenidos permiten obtener esfuerzos para cilindros de n capas y su solución es comparada con solución por elementos finitos. Sus modelos son útiles para la etapa inicial de diseño de cilindros multicapa.

En el rango de las soluciones numéricas se han desarrollado múltiples modelos a partir de elementos finitos como el de Razoki et al. [41] quien definió un modelo para el cálculo de esfuerzos en cilindros compuestos de acero-aluminio bajo la acción de presión, calor y rotación. Hay soluciones numéricas para cilindros compuestos con diferentes relaciones de interferencia y relaciones de contracción, con el fin de determinar relaciones óptimas de contracción para que el esfuerzo máximo según von misses en el radio interno de los dos cilindros fuese igual. Los resultados experimentales determinaron que la fricción propia no tiene efecto sobre la presión de estallido [42].

La mayoría de las investigaciones y modelos desarrollados a la fecha corresponden a sistemas con materiales homogéneos, sin embargo hay muchos casos en la práctica en la cual los materiales son isotrópicos pero no homogéneos, tal es el caso de los materiales funcionalmente graduales o FGM's. HORGAN et al. [43] estudiaron el comportamiento de los esfuerzos en materiales funcionalmente graduales FGM's en el caso especial de un cuerpo donde el módulo de Young depende de la coordenada radial con módulo de poisson constante, encontrando que la respuesta de los esfuerzos en el caso del material no homogéneo es significativamente diferente del cuerpo homogéneo. Algunas de las ecuaciones desarrolladas se presentan a continuación:

$$\tau_{\theta\theta} = \frac{\rho\omega^2}{n} \left[ 8r^2 - 3(n-4)(n-2)r^2 \ln\left(\frac{r}{b}\right) \right] \quad (13)$$

$$\tau_{rr} = \rho\omega^2 \left[ \frac{(n-4)(n-2)}{n} r^2 \ln\left(\frac{r}{b}\right) \right] \quad (14)$$

$$\text{Donde } \frac{8}{3} \leq n \leq \frac{16}{5} \quad (15)$$

Cuando  $n = 0$  se tiene el caso homogéneo entonces

$$\tau_{rr} = \frac{(3+\nu)\rho\omega^2}{8} (b^2 - r^2) > 0 \quad (16)$$

$$\tau_h = \tau_{\theta\theta} = \frac{\rho\omega^2}{8} [(3-\nu)b^2 - (1+3\nu)r^2] > 0 \quad (17)$$

Jabbari et al.[44] han estudiado el efecto mecánico y térmico sobre cilindros huecos multicapa en materiales funcionalmente graduales bajo cargas radiales simétricas, se asume la temperatura como una función del radio y el módulo de elasticidad cambia en función del radio, asumiendo el módulo de poisson como constante.



$$\sigma_{rr} = \frac{E_0}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[ ((1-\nu)\eta_1 + \nu)B_1 r^{\eta_1+m_1-1} + ((1-\nu)\eta_2 + \nu)B_2 r^{\eta_1+m_1-1} \times \right. \\ \left. \left( ((1-\nu)m_2 + 1)D_1 - \frac{(1+\nu)\alpha_0 A_0}{m_3} \right) r^{m_2+m_1} + ((1-\nu)(m_2 - m_3) + 1)D_2 + \frac{(1+\nu)\alpha_0 A_1}{m_3} \right) \times \\ \left. r^{m_2+m_1-m_3} \right] \quad (18)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{E_0}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[ (\nu\eta_1 + 1 - \nu)B_1 r^{\eta_1+m_1-1} + (\nu\eta_2 + 1 - \nu)B_2 r^{\eta_2+m_1-1} \times \right. \\ \left. \left( (\nu m_2 + 1)D_1 - \frac{(1+\nu)\alpha_0 A_2}{m_3} \right) r^{m_2+m_1} + ((\nu(m_2 - m_3) + 1))D_2 + \frac{(1+\nu)\alpha_0 A_1}{m_3} \right) \times r^{m_2+m_1-m_3} \right] \quad (19)$$

Zimmerman et al. [45] desarrollaron un modelo para el cálculo de los esfuerzos en cilindros funcionalmente graduales uniformemente calentados cuyo módulo de elasticidad y coeficiente de expansión térmica varían linealmente con el radio

Zhifei et al. [46] han desarrollado soluciones exactas para cilindros multicapa heterogéneos, un modelo para cilindro multicapa y otro para un cilindro con propiedades que cambian gradualmente utilizando el método del desplazamiento. En este caso se destaca que consideran un cambio lineal del módulo de elasticidad respecto al radio y obtienen una solución general para el caso de un cilindro simple.

$$\sigma_r(r) = \frac{(1-\nu)A}{(1-2\nu)(1+\nu)} \{C_3 r^{\xi_1}(n\xi_1) + C_4 r^{\xi_2}(n + \xi_2)\} \quad (20)$$

$$\sigma_\theta(r) = \frac{(1-\nu)A}{(1-2\nu)(1+\nu)} \{C_3 r^{\xi_1}(1 + n\xi_1) + C_4 r^{\xi_2}(1 + n\xi_2)\} \quad (21)$$

$$C_3 = \frac{(QR_1^{\xi_2} - qR_2^{\xi_2})(1-2\nu)(1+\nu)}{(R_1^{\xi_1}R_2^{\xi_2} - R_2^{\xi_1}R_1^{\xi_2})(n+\xi_1)(1-\nu)A} \quad (22)$$

$$C_4 = \frac{(QR_1^{\xi_1} - qR_2^{\xi_1})(1-2\nu)(1+\nu)}{(R_1^{\xi_2}R_2^{\xi_1} - R_2^{\xi_2}R_1^{\xi_2})(n+\xi_2)(1-\nu)A} \quad (23)$$

$$Z = -\frac{B}{Ar}, \quad u_r = wZ^{\frac{\gamma}{2}}, \quad \gamma = 1 + \sqrt{5 - 4n}, \quad \xi_1 = -\frac{\gamma}{2}, \quad \alpha = \frac{\gamma}{2} + 1, \quad \beta = \frac{\gamma}{2} - 1, \quad \xi_2 = \beta \quad (24)$$

$$E = Ar + B \quad (25)$$

Donde E es el módulo de elasticidad, A y B son constantes del material, R1 = radio interno y R2= radio externo.

Kansal y parvez[47] analizaron el comportamiento de los esfuerzos en materiales ortotropicamente graduales sometidos a temperatura con distribución decreciente con el radio, encontrando que con el incremento de temperatura los esfuerzos tangenciales disminuyen en la superficie interior mientras se incrementan en la superior y el esfuerzo radial se reduce gradualmente para todas las distribuciones de temperatura.

La revisión del estado del arte permitió establecer que los modelos actualmente desarrollados no incluyen relaciones no lineales entre módulo de elasticidad y el radio o la temperatura en su mayoría, y los pocos modelos que si incluyen relaciones no lineales como el caso del modelo de Jabbari son limitados a funciones de potencia. Tampoco se encontraron modelos de este tipo que incluyan el efecto del tiempo sobre el cálculo de los desplazamientos y los esfuerzos.

La tabla 4. Presenta un resumen comparativo del estado del arte relacionado con los modelos de sistemas de cilindros multicapa existentes y los modelos que se busca desarrollar en la presente investigación, especificándose los aspectos diferenciadores y aportes de un modelo respecto a otro. Los modelos se presentan en orden cronológico.

Modelo	# de cilindros	Material de los cilindros diferentes	Temperatura variable	Isotrópico	Homogeneo	Modulo de YOUNG variable	Tipo de relación módulo de YOUNG/radio	Poisson variable con la temperatura	Coefficiente expansión térmica variable	Solución algebraica	efecto del tiempo (creep)
Lamé (1833)	1	NO	NO	SI	SI	NO	N/A	NO	NO	SI	NO
Margetson (1976)	1	NO	SI	SI	SI	NO	N/A	NO	NO	NO	NO
Horgan-Chan (1999)	1	FGM(funcionalmente gradual)	no incluye efecto térmico	SI	NO	Variable con el radio	Potencial	NO	NO	SI	NO
Jabbari(2002)	1	FGM(funcionalmente gradual)	SI	SI	NO	Variable con el radio	potencial	NO	SI	SI	NO
Zhang(2012)	Multicilindros	SI	SI	SI	SI	Variable con el radio	potencial	NO	NO	NO	NO
Sollund -1-(2014)	Multicilindros	SI	NO	SI	SI	NO	N/A	NO	NO	SI	NO
Sollund -2-(2014)	Multicilindros	SI	SI	SI	SI	NO	N/A	NO	NO	SI	NO
Modelo a desarrollar-1-(2017)	3	SI	SI	SI	NO	Variable con el radio	cualquier tipo de relación	NO	NO	NO	NO
Modelo a desarrollar-2-(2017)	3	SI	SI	SI	NO	Variable con el radio	cualquier tipo de relación	NO	NO	NO	SI

**Tabla 4.** Resumen estado del arte modelos cálculo de esfuerzo en cilindros huecos y comparativo con modelos a desarrollar

El presente estudio busca aportar dos modelos analíticos que permitan calcular esfuerzos y desplazamientos en un sistema de cilindros multicapas. En el primer modelo a desarrollar se busca que al menos una capa cilíndrica posea módulo de elasticidad variable y dependiente de la temperatura con cualquier relación módulo de elasticidad y radio. En el segundo modelo se busca incluir el tiempo y las constantes visco elásticas para analizar el efecto del creep, todo esto de manera adicional a lo ya incluido en el primer modelo.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo General**

Evaluar el comportamiento termomecánico del sistema de refuerzo existente (Camisa tipo A) sobre la integridad estructural de tramos de tuberías de Gas Natural de Promigas S.A., ante un escenario de incremento de presión y temperatura en la línea de distribución.

#### **3.2. Objetivos específicos.**

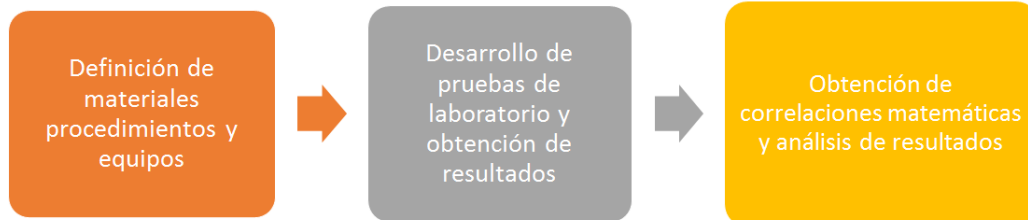
- Construir un banco de pruebas para evaluar el desempeño estructural del Sistema de refuerzo actual, permitiendo simular las condiciones de presión de 850 psi y temperatura de hasta 120°F.
- Desarrollar pruebas de tensión de polímeros con acción de calor para obtener curvas esfuerzo deformación a diferentes temperaturas
- Comparar las propiedades mecánicas de 3 tipos de resina epóxica bajo la acción de distintos valores de temperatura con el fin de evaluar el desempeño de la resina SIKADUR 32 con otras resinas del mercado de aplicaciones similares
- Caracterizar la respuesta del módulo de elasticidad de los distintos tipos de resina respecto a la temperatura por medio de modelos matemáticos
- Desarrollar un modelo analítico que permita calcular los esfuerzos en sistema de cilindros multicapa bajo la acción de temperatura y en condiciones de no homogeneidad debidas a módulo de elasticidad variable en sentido radial.
- Desarrollar un modelo computacional basado en elementos finitos para predecir los esfuerzos y deformaciones en el sistema de refuerzo, permitiendo verificar el efecto en un cambio de las variables del sistema y que permita validar los resultados del modelo analítico.
- Determinar la distribución de carga entre la tubería y el sistema de refuerzo y validar los valores obtenidos con la instrumentación con los valores de esfuerzo determinados a partir de los modelos analítico y computacional.

#### 4. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE RESINAS A DIFERENTES NIVELES DE TEMPERATURA

Uno de los aspectos centrales para la evaluación termomecánica de los sistemas de rehabilitación es el hecho de conocer el comportamiento de las resinas utilizadas como refuerzo ante eventos de aumentos de presión y/o temperatura ya que las variaciones en rigidez que estas presenten tienen un efecto significativo sobre la distribución de esfuerzos en la tubería. Para este fin se hace entonces necesario conocer la correlación entre temperatura y módulo de Young para distintos tipos de resinas epóxicas de origen comercial, y determinar qué tipos de resinas son más convenientes para las labores de rehabilitación de tubería.

##### 4.1. Metodología

La caracterización de las resinas tiene un enfoque experimental y se enfoca en la medición de las propiedades mecánicas a varios niveles de temperatura. Se desarrolla en 3 grandes etapas que se aprecian en el siguiente diagrama:



**Figura 16.** Etapas principales en la metodología de caracterización de resinas

##### 4.1.1. Definición de materiales, procedimientos y equipos

El objetivo de esta etapa es definir los materiales que son objeto de estudio y las sustancias que los conforman, así como establecer las diferentes normas, procedimientos y equipos que son requeridos para cada paso del proceso.

##### 4.1.1.1. Materiales

Promigas S.A E.S.P utiliza actualmente la resina SIKADUR 32 como elemento de refuerzo para los sistemas de rehabilitación tipo camisa en tuberías de transporte de gas, esto hace que sea imperativo incluir este tipo de resina dentro de los materiales a ser evaluados.

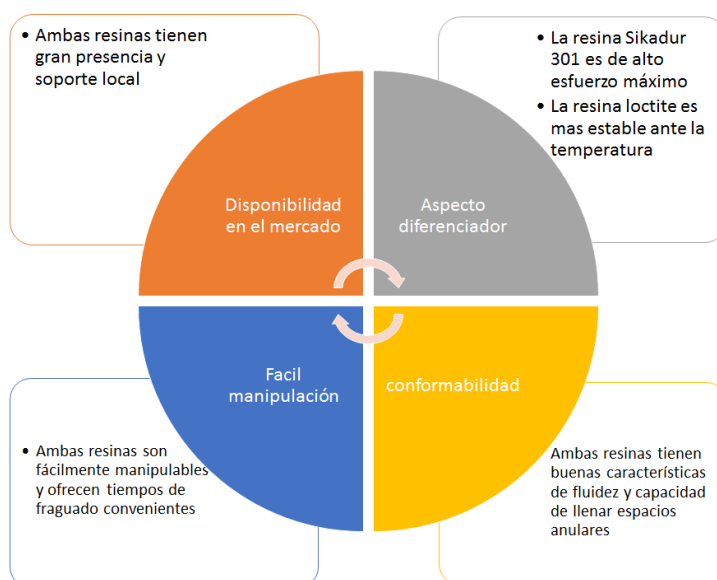
La resina SIKADUR 32 consta de dos componentes (A y B). El detalle de las sustancias que conforman la resina en mención se encuentra en la siguiente tabla.

SIKADUR 32 COMPONENTE A		
NOMBRE QUÍMICO	No CAS	CONCENTRACIÓN
Bisphenol-A-(epiclorhidrina)Resina epóxica	25068	$\geq 50 - \leq 100\%$
Fenol,4 nonil,ramificado	84852-15-3	$\geq 5 - \leq 10\%$
2,3-epoxipropilo o-tolil eter	2210-79-9	$\geq 2 - \leq 5\%$
Nafta disolvente(petróleo), aromático pesado	64742-94-5	$\geq 1 - 2\%$
Naftaleno, puro	91-20-3	$\geq 0 - \leq 1\%$
SIKADUR 32 COMPONENTE B		
NOMBRE QUÍMICO	No CAS	CONCENTRACIÓN
QUARTZ(SiO <sub>2</sub> )	14808-60-7	$\geq 50 - \leq 100\%$
Fenol,4 nonil,ramificado	84852-15-3	$\geq 5 - \leq 10\%$
Isoforonediamina	2855-13-2	$\geq 5 - \leq 10\%$
2-piperazina-1-ylethylamina	140-31-8	$\geq 2 - \leq 5\%$
Nafta disolvente(petróleo), aromático pesado	64742-94-5	$\geq 1 - \leq 5\%$
2,4,6-tris(dimetilaminometil)fenol	90-72-2	$\geq 1 - \leq 5\%$
alcohol de bencilo	100-51-6	$\geq 1 - \leq 5\%$
3,6-dioxaoctametilnediamina	929-59-9	$\geq 1 - \leq 5\%$
dioxido de titanio	13463-67-7	$\geq 0 - \leq 1\%$
QUARTZ(SiO <sub>2</sub> )<5µm	14808-60-7	$\geq 0 - \leq 1\%$
Naftaleno, puro	91-20-3	$\geq 0 - \leq 1\%$

**Tabla 5.** Sustancias que componen el SIKADUR 32

Adicional a la resina SIKADUR 32, se consideró conveniente comparar el desempeño de otros tipos de resinas epóxicas del mercado, esto con el fin de obtener más valores de referencia que permitan ampliar el panorama existente y evaluar la posible influencia de los subcomponentes sobre el desempeño termomecánico de las resinas.

Las resinas adicionales que se incluyeron en la caracterización son la sikadur 301 y la loctite pc9462. Ambas resinas son de procedencia comercial y se escogieron teniendo en cuenta los siguientes aspectos.



**Figura 17.** Criterios utilizados para seleccionar las resinas

Las sustancias que conforman el sikadur 301 y el loctite pc 9462 se describen en las siguientes tablas:

SIKADUR 301 COMPONENTE A		
NOMBRE QUÍMICO	No CAS	CONCENTRACIÓN
Bisphenol-A-(epiclorhidrina)Resina epóxica	25068-38-6	>=50- <=100%
1,3-bis(2,3-epoxipropoxi)-2,2,dimetilpropano	17557-23-2	>=2- <=5%
bisfenol A-(epiclorhidrina), homopolimero	25085-99-8	>=2- <=5%
Nafta disolvente(petróleo), aromático pesado	64742-94-5	>=1-2%
Naftaleno, puro	91-20-3	>=0- <1%
SIKADUR 301 COMPONENTE B		
NOMBRE QUÍMICO	No CAS	CONCENTRACIÓN
polioxypropilenediamina	9046-10-0	>=50- <=100%
alcohol de benzilo	100-51-6	>=10- <10%
Isoforonediamina	2855-13-2	>=10- <10%

**Tabla 6.** Sustancias que componen el SIKADUR 301

LOCTITE PC 9462		
NOMBRE QUÍMICO	No CAS	CONCENTRACIÓN
Piedra caliza	1317-65-3	>=60- <=70%
epiclorhidrina-4,4'-isopropilidena	25068-38-6	>=20- <=30%
nonifenol	25154-52-3	>=1- <=5%
butil 2,3 epoxipropil eter	2426-08-6	>=1- <=5%

**Tabla 7.** Sustancias que componen el LOCTITE PC 9462

#### 4.1.1.2. Procedimientos

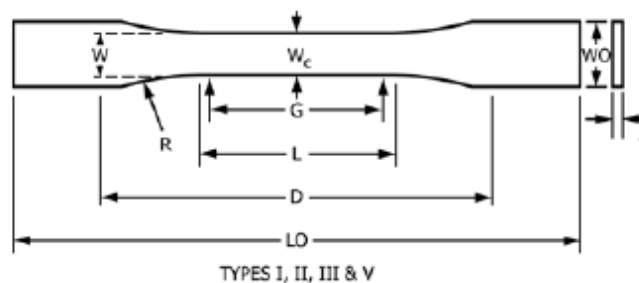
Los procedimientos requeridos para la caracterización de las resinas se describen en el siguiente esquema:



**Figura 18.** Procedimientos para la caracterización de las resinas

El paso previo a todos los procedimientos fue el de la obtención del molde para obtener las probetas de resina epóxica. El molde puede ser metálico o de madera con la recomendación de que la superficie sea lo más pulida posible y con ángulos de salida recomendados.

Para definir el tamaño de las probetas se utilizó la norma ASTM D638[48] y se seleccionó el tipo de probeta III. En la figura siguiente se aprecian las dimensiones de las probetas.



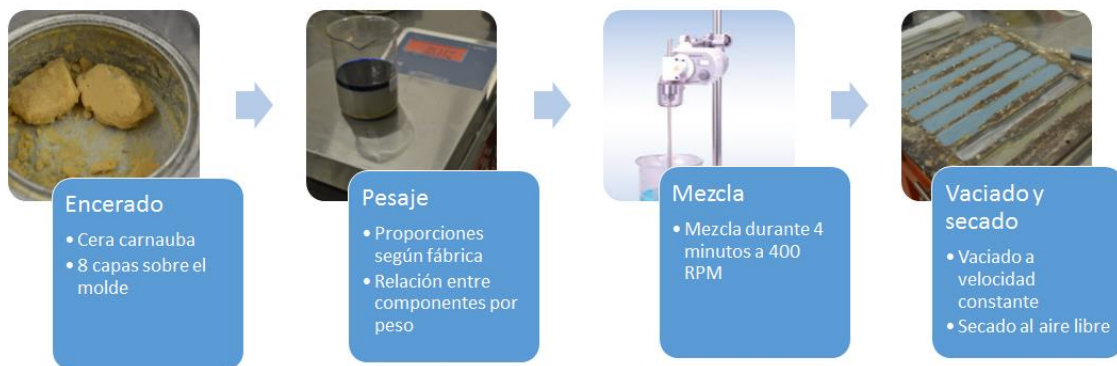
**Figura 19.** Esquema probeta tipo III. tomado de [48]

Dimensión	Valor(mm)
Lo	246
D	115
L	57
G	---
W	19
WO	29
T	7
R	76

**Tabla 8.** Dimensiones probeta tipo III

### • Moldeo

Para realizar las pruebas de tensión se requiere una fabricación previa de las probetas, la técnica que se utiliza para este fin es el moldeo. El moldeo consta de 4 etapas básicas.



**Figura 20.** Pasos proceso de moldeo [48]

- (i) **Encerado:** en esta etapa se aplican varias capas de cera desmoldeante tipo carnauba sobre el molde de acero. Después de la aplicación de cada capa debe permitirse un tiempo de secado de aproximadamente 10 minutos y una posterior extracción del excedente de cera y pulido del molde con tela. Se recomienda pasar unas 5 a 6 capas de cera antes de verter la resina sobre el molde.
- (ii) **Pesaje:** en esta etapa se pesa cada componente según la proporción definida por el fabricante. Al final cada una de las componentes se vierten sobre un mismo recipiente (preferiblemente tipo vickers) y el peso total debe ser al menos un 10% superior al peso que requiere el volumen de las probetas en el molde
- (iii) **Mezcla:** La mezcla de los dos componentes de la resina (Base y endurecedor) debe realizarse con un agitador especial durante un tiempo no inferior a 3 minutos a velocidades cercanas a los 400 RPM.
- (iv) **Vaciado y secado:** una vez terminado el tiempo de mezcla se procede a vaciar la resina sobre el molde, intentando en lo posible hacerlo de manera uniforme y dependiendo el tipo de resina el tiempo de espera para el retiro de las resinas puede ser de 4 a 24 horas. Las resinas deben ser retiradas en estado “verde” ya que si no se retiran a tiempo se corre el riesgo de que se rigidicen demasiado y se fracturen durante la



extracción. Después de la extracción, las resinas deben tomar entre 4 y 7 días para lograr una resistencia significativa, esto en vista de que el proceso se hace sin poscurado.

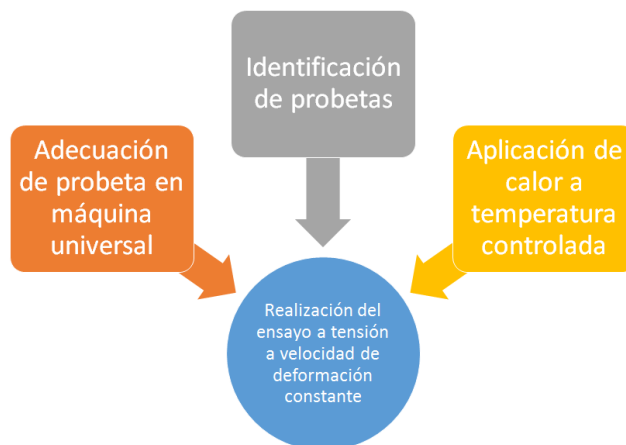
- **Ensayos a tensión de probetas a temperatura controlada**

Una vez que se cuenta con las probetas suficientes y ha transcurrido el tiempo de curado recomendado, se procede a la realización de las pruebas de ensayo a tensión. Las pruebas se realizan según la norma ASTM D638 y las condiciones experimentales son las siguientes

Condiciones experimentales prueba tensión probetas resina				
No	Tipo	# de probetas	Temperatura (°C)	Tasa deformación
1	SIKADUR 32	5	25	0,1/min
2	SIKADUR 32	5	30	0,1/min
3	SIKADUR 32	5	35	0,1/min
4	SIKADUR 32	5	40	0,1/min
5	SIKADUR 32	5	45	0,1/min
6	SIKADUR 32	5	50	0,1/min
7	SIKADUR 32	5	55	0,1/min
8	SIKADUR 301	5	25	0,1/min
9	SIKADUR 301	5	30	0,1/min
10	SIKADUR 301	5	35	0,1/min
11	SIKADUR 301	5	40	0,1/min
12	SIKADUR 301	5	45	0,1/min
13	SIKADUR 301	5	50	0,1/min
14	SIKADUR 301	5	55	0,1/min
15	LOCTITE PC 9462	5	25	0,1/min
16	LOCTITE PC 9462	5	30	0,1/min
17	LOCTITE PC 9462	5	35	0,1/min
18	LOCTITE PC 9462	5	40	0,1/min
19	LOCTITE PC 9462	5	45	0,1/min
20	LOCTITE PC 9462	5	50	0,1/min
21	LOCTITE PC 9462	5	55	0,1/min

**Tabla 9.** Condiciones experimentales ensayo de tensión a temperaturas varias

Algunas labores de soporte son necesarias para la realización del ensayo a tensión, Entre las que se destaca:



**Figura 21.** Acciones complementarias para prueba de tensión [48]

- (i) **Adecuación de probeta en maquina universal:** esta labor consiste en la colocación correcta de la probeta en las mordazas de la máquina y del extensómetro a la distancia especificada
- (ii) **Identificación de las probetas:** es importante identificar cada probeta de manera previa al ensayo con un código que especifique el material de la probeta y la temperatura a la que se debe realizar el ensayo.
- (iii) **Aplicación de calor a temperatura controlada:** en vista de que se busca caracterizar el comportamiento a tensión de las resinas a diferentes temperaturas, se hace necesario utilizar un sistema que garantice una temperatura en la probeta según las condiciones experimentales definidas anteriormente.

- **Ensayo de dureza tipo BARCOL**

El ensayo de dureza es importante para la determinación del tiempo de curado de las probetas a temperatura ambiente. La realización de estas pruebas se ejecuta según las siguientes condiciones experimentales:

Condiciones experimentales prueba dureza probetas resina				
No	Tipo	Replicas	Frecuencia	Intervalo
1	SIKADUR 32	3	diaria	14 días
2	SIKADUR 301	3	diaria	14 días
3	LOCTITE PC9462	3	diaria	14 días

**Tabla 10.** Condiciones experimentales ensayo dureza barcol

#### 4.1.1.3. Equipos

**Molde:** Se fabricó un molde de acero de 30X30 cm para el vaciado de la resina y obtención de hasta 7 probetas por lote.



**Figura 22.** Molde para obtención de probetas

**Máquina universal de ensayos:** Para la realización de la prueba de tensión se utilizó una máquina de tensión universal marca Soiltest de 300KN a tensión, control automax 5 de Controls, y sistema de adquisición de datos pacific instruments 6010U, con tasa de deformación de 0.1/min.

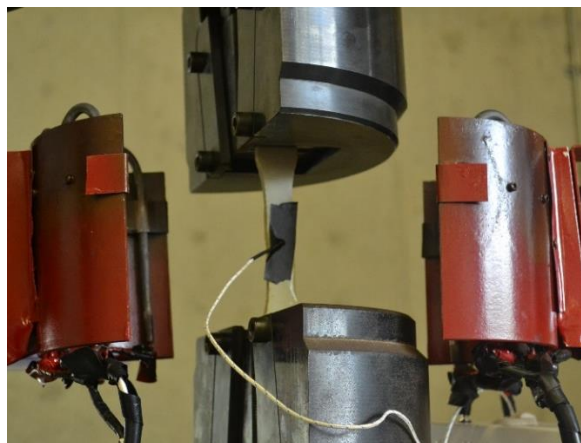


**Figura 23.** Equipo de adquisición de datos pacific instruments 6010U (izq) y controlador automax 5(der)

**Sistema de calentamiento:** Para el sistema de calentamiento de probetas se construyó y utilizó un calentador por radiación de 1.5 KW compuesto por dos casquetes de acero con resistencias eléctricas, con sistema de control ON-OFF Autonics TNZ y termocupla tipo K.

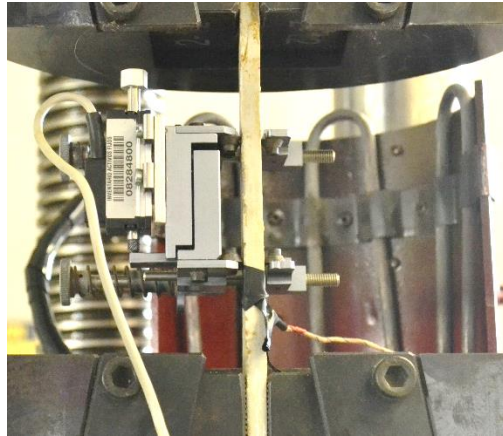
El sistema de calentamiento fue fabricado dentro del marco del proyecto y consta de diferentes partes para su funcionamiento:

1. El sistema consta de 2 casquetes de radiación fueron contruidos a partir de dos mitades de tubería de acero. tienen instaladas resistencias eléctricas de 750KW cada uno.



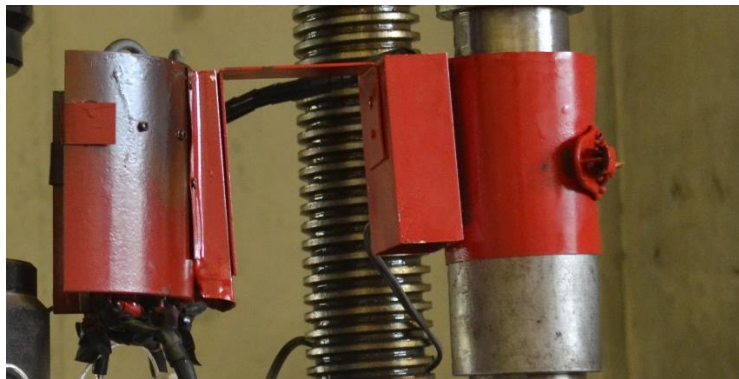
**Figura 24.** Detalle casquetes de radiación

2. Cada casquete tiene un circuito conformado por 3 resistencias en paralelo de 250 KW 110V . en la figura siguiente se aprecia la configuración de las resistencias en el casquete



**Figura 25.** *Circuito de resistencias eléctricas por casquete*

3. Cada casquete tiene una base con extremo flexible abrochable el cual es ajustable a las guías cilíndricas de la máquina universal. Esto permite que la posición angular y la altura se ajuste a la necesidad de cada caso.



**Figura 26.** *Brazo sujetador para casquete de radiación*

4. Para controlar la temperatura se utilizó un controlador autonics tipo on-off. La caja de control también incluye elementos de protección, switch de encendido, contactor, termocupla tipo K y cableado en general.



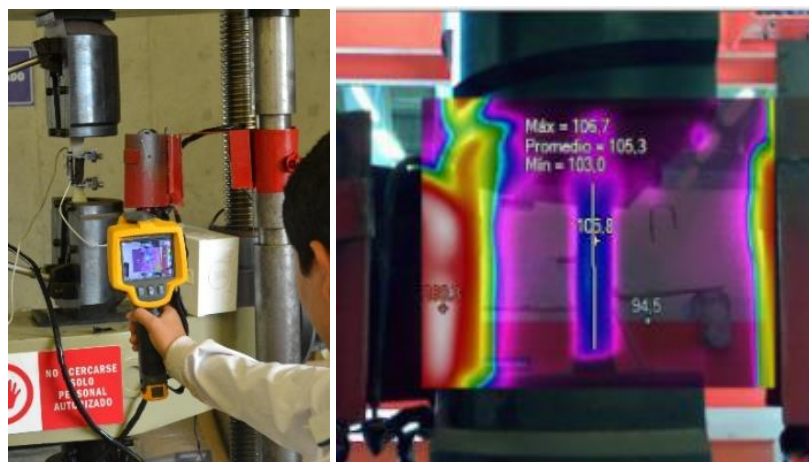
**Figura 27.** Caja de control sistema de calentamiento por radiación

la configuración general del sistema de calentamiento instalado sobre la máquina universal se aprecia en la siguiente figura.



**Figura 28.** Máquina universal SOILTEST con sistema de calentamiento de probetas.

Para verificar la acción homogénea del calentamiento de la probeta se realizaron verificaciones con cámara infraroja FLUKE TI25 con la cual se hizo un barrido de temperatura longitudinal encontrándose variaciones despreciables de temperatura a lo largo de la probeta como se aprecia en la figura 29



**Figura 29.** Verificación de calentamiento homogéneo en probetas



**Durómetro Barcol:** Para la medición de la dureza en las probetas se utilizó un durómetro Barcol como el que se aprecia en la figura 30.

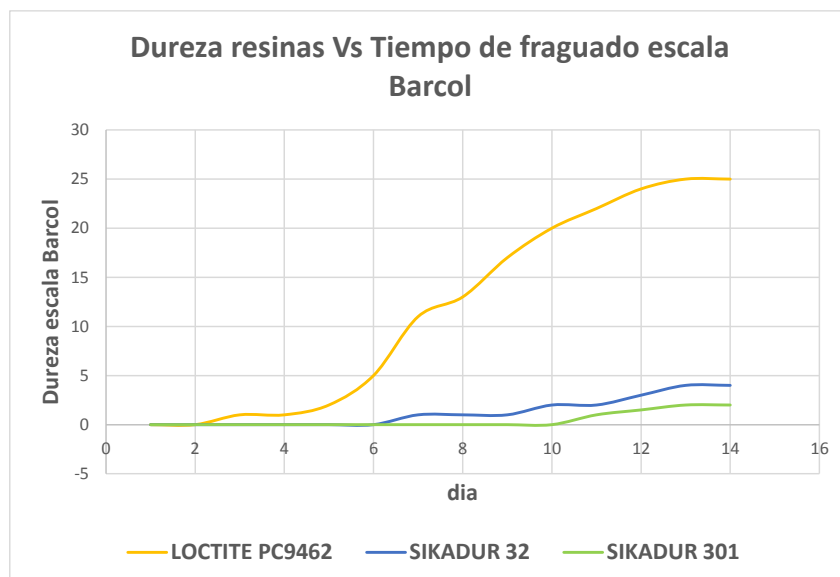


**Figura 30.** *Durómetro Barcol impresor*

#### 4.1.2. Desarrollo de pruebas de laboratorio y obtención de resultados

##### Resultados caracterización dureza resinas

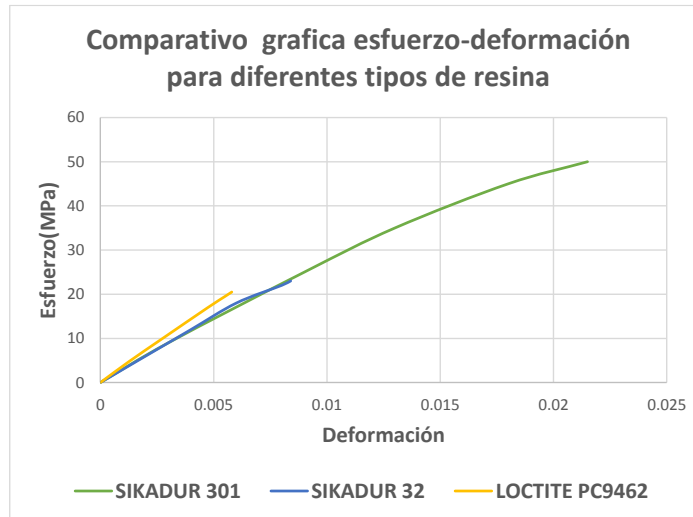
Los resultados de las pruebas de dureza se observan en la figura 21, se aprecia como la Resina Loctite alcanza mayores niveles de dureza en comparación a las otras, esto gracias a su proceso de curado más rápido gracias a la piedra caliza.



**Figura 31.** *Incremento de la dureza con el aumento del tiempo después de fraguado*

### Curva esfuerzo deformación sin acción de la temperatura

En la figura 32 se aprecia la comparativa de las gráficas esfuerzo deformación para cada una de las resinas a temperatura ambiente, encontrándose que la resina LOCTITE es la más rígida y la SIKADUR 301 posee mayor tenacidad y esfuerzo máximo.

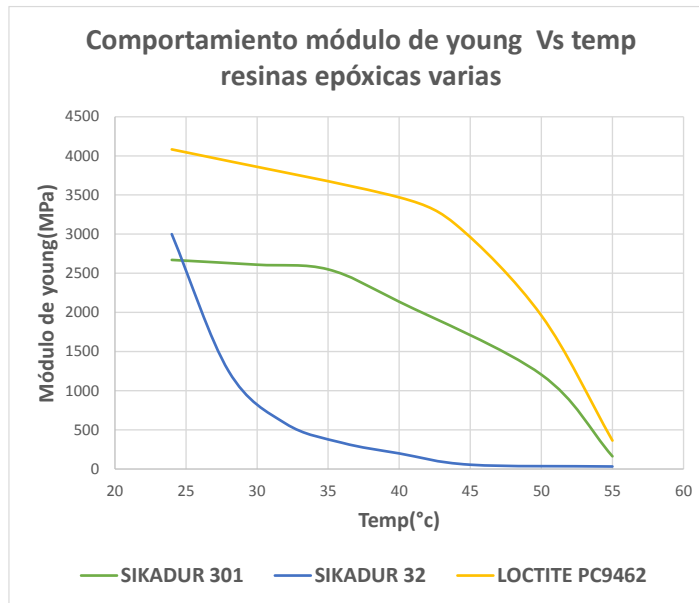


**Figura 32.** *Grafica comparativa Esfuerzo Vs deformación para diferentes tipos de resina epóxica a temperatura ambiente*

### Curvas esfuerzo deformación con acción de la temperatura

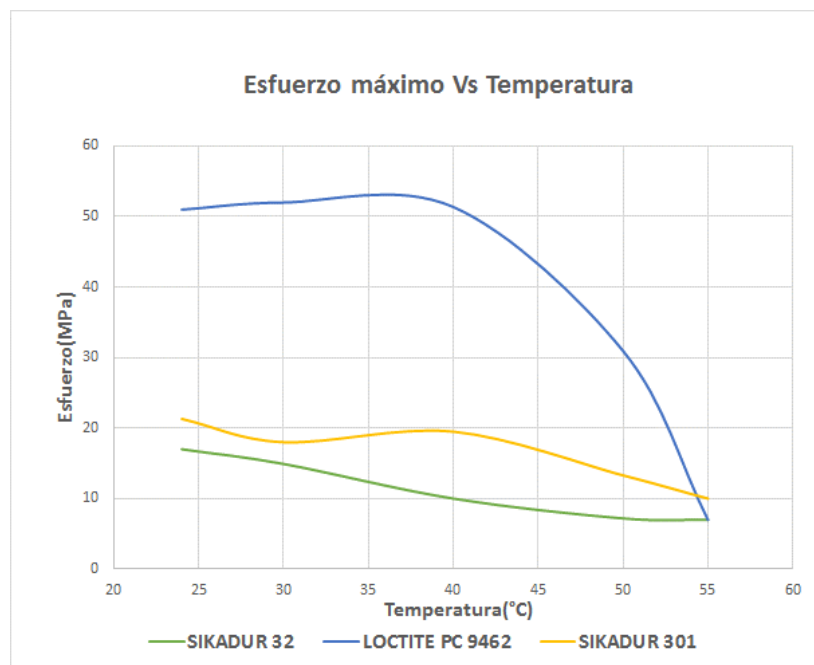
Las pruebas de tensión con variación de temperatura arrojaron 2 tipos de resultados. El primero consiste en la variación del esfuerzo máximo con la temperatura, y el segundo corresponde al cambio del módulo de Young con el aumento de la temperatura. Los resultados correspondientes se aprecian en las figuras 33 y 34

Se aprecia en la figura 33 que la resina LOCTITE posee más estabilidad en el módulo de Young con el aumento de temperatura de la prueba, teniendo una disminución significativa a partir de los 43°C, mientras que la resina SIKADUR 301 es estable hasta los 35°C y la resina SIKADUR 32 no tolera cambios de temperatura en relación con el módulo de Young.



**Figura 33.** Variación del módulo de Young respecto al aumento de temperatura

La resina B posee mayores niveles de esfuerzo máximo aun con el aumento de la temperatura. Mientras que la resina A presenta el más bajo desempeño en ambos casos.

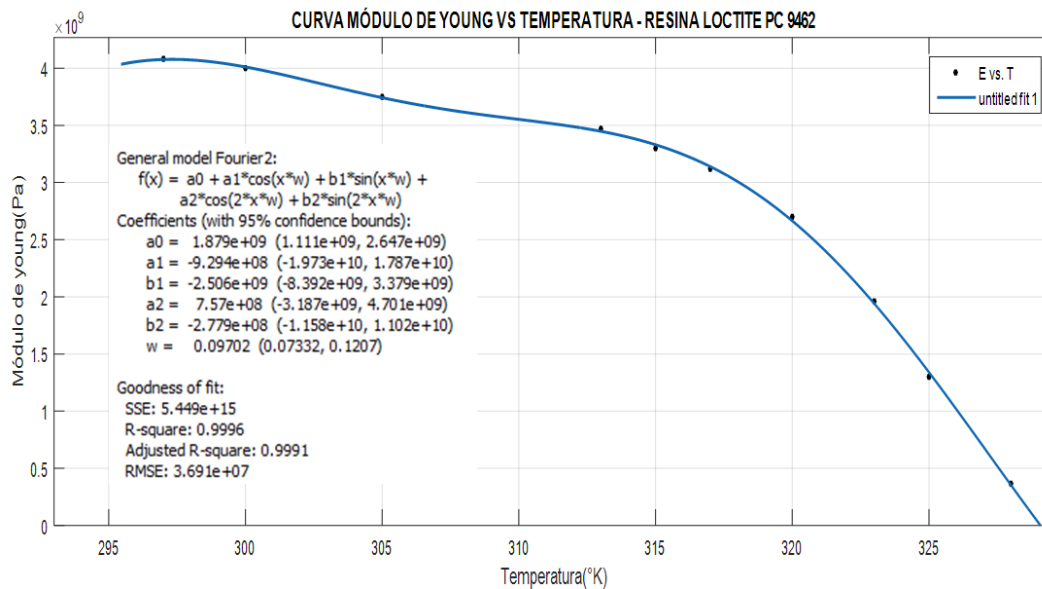


**Figura 34.** Variación del esfuerzo máximo respecto al aumento de temperatura



#### 4.1.3. Obtención de correlaciones matemáticas y análisis de resultados de la caracterización de resinas

Con los datos obtenidos para cada resina se procedió a realizar ajustes de curva para cada resina y obtener las expresiones matemáticas que representan cada correlación entre temperatura y módulo de Young. La figura 35 muestra la curva de ajuste del LOCTITE PC9462



**Figura 35.** Curva de ajuste Temp-Módulo de Young para LOCTITE PC9462

En la tabla 11 se aprecian los valores de la correlación matemática entre Módulo de Young y temperatura para cada una de las resinas bajo estudio.

Tipo de resina	Correlación matemática	Ajuste(R <sup>2</sup> )
SIKADUR 32	$E = 1.281e34 * e^{-0.1906 \cdot T}$	<b>0.99</b>
SIKADUR 301	$E = -0.0322 * e^{0.07742 \cdot T \cdot \ln 2} + 4.943e8 * e^{0.006067 \cdot T}$	<b>0.99</b>
LOCTITE PC 9462	$E = 1.87 \times 10^9 - 9.29 \times 10^8 * \cos(0.097 * T) - 2.506 \times 10^9 * \sin(0.097 * T) + 7.57 \times 10^8 * \cos(2 * T * 0.09702) - 2.77 \times 10^8 * \sin(2 * T * 0.097)$	<b>0.99</b>

Tabla 11. Correlación matemática entre módulo de Young (E) y temperatura para varias resinas

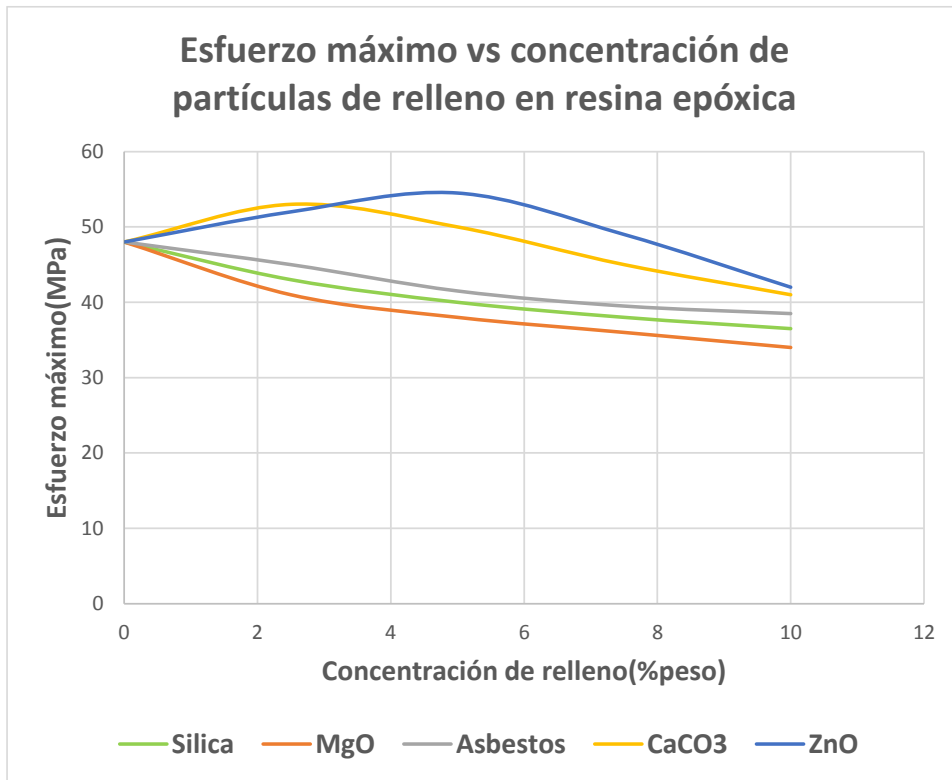
Es claro el efecto de la temperatura sobre la disminución de las propiedades mecánicas de las resinas epóxicas. Se nota un mejor desempeño de la resina LOCTITE PC 9462 en lo respectivo a la conservación de niveles de módulo de Young con el aumento de la temperatura, lo cual no es el caso de las otras resinas

La resina SIKADUR 32 presenta una disminución significativa del módulo de Young con el aumento de la temperatura. Mientras que la resina SIKADUR 301 presenta un comportamiento similar a la LOCTITE PC 9462 pero con menores valores de rigidez. Teniendo en cuenta que las 3 resinas fueron sometidas a carga bajo las mismas condiciones de temperatura y tasa de deformación, la explicación acerca de las diferencias en los cambios de rigidez debidas a aumento de temperatura se pueden explicar con la naturaleza de las sustancias que conforman las resinas, las cuales se describen en las tablas 6,7 y 8.

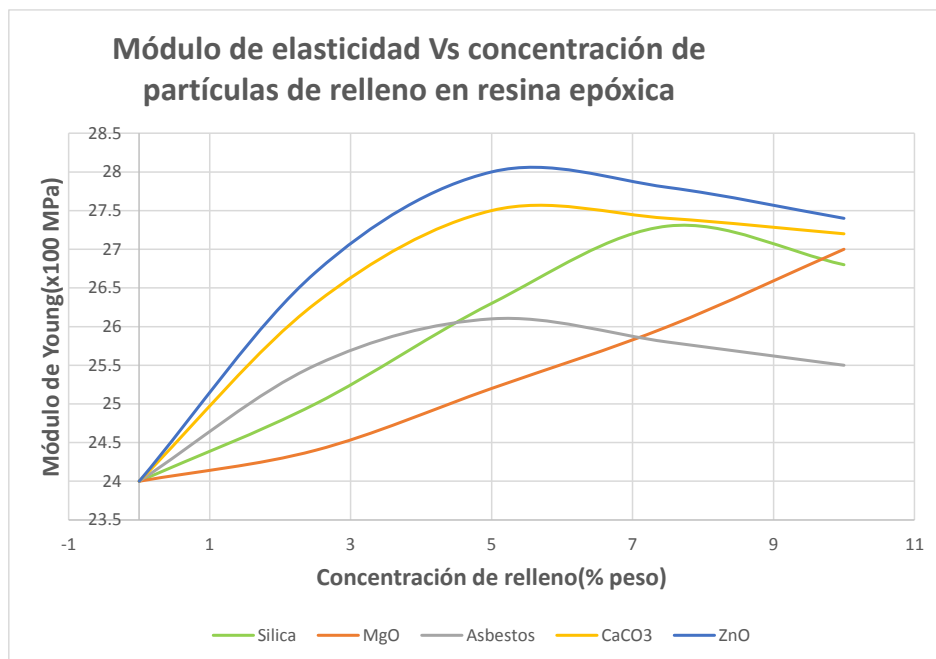
La resina SIKADUR 32 contiene QUARTZ ( $\text{SiO}_2$ ) también llamado silica como relleno en un porcentaje superior al 50%. Por su parte la resina LOCTITE contiene en mayor concentración (60-70%) de piedra caliza, también conocido como carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), este componente mejora la estabilidad térmica de la resina de manera significativa. Estos resultados se pueden interpretar con referencia a la adición de nano- $\text{CaCO}_3$  a la matriz epoxi, que aumenta el área de contacto superficial entre las partículas de nano- $\text{CaCO}_3$  y la matriz de epoxi, que a su vez impide la difusión del calor durante la reacción de los nanocompuestos TGPAP /  $\text{CaCO}_3$ . los resultados también se pueden atribuir a la mayor densidad de reticulación de los nanocompuestos[49]. De esta manera las partículas de caliza al absorber la mayor cantidad de calor evitan que la matriz de resina se debilite o pierda sus características con mayor rapidez.

Por su parte Jin y Park [24] determinaron que la adición de piedra caliza en tamaño nano  $\text{CaCO}_3$  al sistema epoxi-amina, origina un enlace de hidrógeno entre el oxígeno del epóxido y el hidrógeno del ácido searico en las superficies de nano- $\text{CaCO}_3$ , lo que da como resultado la aceleración de la reacción amina-epóxido a través de una etapa de transición termolecular unida a hidrógeno. Esta aceleración de la reacción entre la amina y el epóxico disminuye el tiempo de curado permitiendo que la resina obtenga valores de dureza y resistencia mayores en menor tiempo si se compara con una resina sin relleno o con otro tipo de relleno diferente a la piedra caliza.

UNNIKRISHNAN [18] realizó importantes comparaciones acerca del efecto de la adición de diferentes tipos de rellenos en la resina epóxica sobre las propiedades mecánicas. Su investigación compara el aumento de concentración de los rellenos en relación al esfuerzo máximo, al módulo de elasticidad entre otros. Estas comparativas se aprecian en las figuras 36 y 37.



**Figura 36.** Esfuerzo máximo vs concentración de partículas de relleno en resina epóxica, tomado y modificado de [18]



**Figura 37.** Módulo de elasticidad Vs concentración de partículas de relleno en resina epóxica, tomado y modificado de [18]

Las figuras 36 y 37 realizadas por UNNIKRISHNAN [18] permiten entender que la piedra caliza o  $\text{CaCO}_3$  mejora en mayor medida las propiedades mecánicas de la resina epóxica si se compara con el caso de la silica(Quartz), si tenemos en cuenta que el quartz o silica es el elemento utilizado por la resina SIKADUR 32 podemos entonces entender en parte las razones del desempeño inferior de la misma en comparación a la resina LOCITE PC9462.

La mayor estabilidad térmica que brinda la piedra caliza a la resina epóxica con respecto al quartz se debe en gran medida a que la piedra caliza posee un calor específico superior al del quartz (1000 J/gK vs 732 J/gK) lo que le facilita a la piedra caliza absorber más carga térmica y evitar que sea absorbida por la matriz de resina epóxica.

El caso de la resina SIKADUR 301 la cual es una resina epóxica sin relleno de material particulado, se encuentra que posee los mayores valores de resistencia a la tracción, pero los menores en lo relacionado a módulo de elasticidad. Este hecho fue estudiado por Ibtihal et al. [28] donde estudia el efecto del quartz sobre el aumento del módulo de rigidez y la disminución del esfuerzo o resistencia máxima.

Los sistemas de rehabilitación requieren de elementos de refuerzo que disminuyan los esfuerzos en la tubería, es por eso que es conveniente que la resina epóxica seleccionada mantenga sus propiedades mecánicas y en especial el módulo de rigidez lo más alto posible y lo más estable posible respecto a los cambios de temperatura.

#### **4.2. Observaciones generales de la caracterización de resinas**

- La resina SIKADUR 32 no presenta la mejor estabilidad en su rigidez ante cambios de temperatura, por lo que es recomendable el uso de resinas con mejores prestaciones mecánicas
- Es recomendable explorar la posibilidad de caracterizar resinas con diferentes materiales de relleno para obtener aún mejores prestaciones mecánicas
- Las resinas más puras como la SIKADUR 301 tienen mejor equilibrio entre esfuerzo máximo y módulo de Young. Sin embargo no son las más recomendables si la prioridad es brindar rigidez al sistema de rehabilitación.

## **5. DESARROLLO DE MODELOS ANALÍTICOS PARA EL CALCULO DE ESFUERZOS Y DESPLAZAMIENTOS EN SISTEMA DE CILINDROS MULTICAPA**

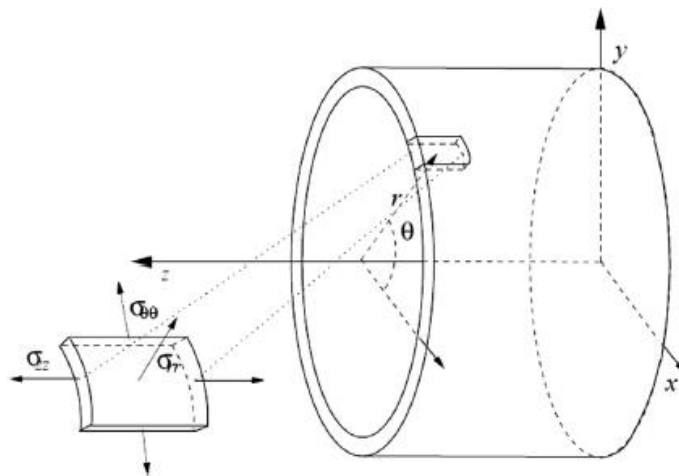
Es de gran importancia contar con modelos analíticos que permitan conocer los esfuerzos a que se someten los elementos que componen el sistema de rehabilitación de tubería de transporte de gas, en especial para valorar el efecto de dicho sistema sobre la reducción de esfuerzos en la tubería y en especial en la zona del defecto. En capítulos anteriores se observó una relación no lineal entre el módulo de Young y la temperatura en las resinas, las cuales son el material que conforma el cilindro # 2 tal como se aprecia en la figura 5. La condición de variación del módulo de Young a lo largo del radio en la resina conduce a la necesidad de abordar un problema isotrópico pero no homogéneo. Los modelos descritos en el estado del arte son en su mayoría apropiados para materiales homogéneos e isotrópicos, pocos modelos como el de Jabbari[50] abordan los materiales no homogéneos en que el módulo de elasticidad se considera variable con el radio. Sin embargo el modelo de Jabbari utiliza una relación de ley de potencia entre el radio y el módulo de elasticidad la cual no es aplicable para las relaciones observadas en las resinas las cuales son principalmente exponenciales o de Fourier. Por lo anteriormente mencionado se hace necesario entonces proponer un modelo que permita conocer los esfuerzos y desplazamientos radiales en la capa cilíndrica de resina con relación a los comportamientos de variación de rigidez de las resinas ante cambios de temperatura y de esta manera poder ajustar con más precisión los valores de presiones de interferencia y de esta manera calcular los esfuerzos en la tubería con mayor precisión. El modelo también permite conocer los diferentes perfiles de esfuerzo tangencial y radial en la resina y hacer análisis acerca de la posibilidad de falla de la misma o generación de problemas de delaminación por formación de perfiles de esfuerzos tangenciales con zonas a tensión y a compresión. De esta manera el modelo aquí presentado se complementa con el modelo de lamé, en el cual la teoría de Lamé se utiliza para el cálculo de esfuerzos y deformaciones en la tubería y la camisa y el modelo propuesto para el cálculo de esfuerzos y deformaciones en la resina.

### **5.1. Modelo analítico para el cálculo de esfuerzos en cilindros multicapa con variación del módulo de Young con la temperatura**

El modelo desarrollado se basa en una solución derivada de la solución analítica generalizada para el cálculo de esfuerzos en cilindros huecos. Los siguientes supuestos se tienen en cuenta para la definición del modelo.

- (i) El material de cada capa de cilindro es isotrópico
- (ii) Todas las capas de cilindro son perfectamente ajustadas y no existen tolerancias o vacíos entre ellas

- (iii) La deformación satisface la ley de Hooke y la teoría de las pequeñas deformaciones
- (iv) Todas las variables son asumidas como dependientes del radio por tratarse de un problema de tipo axisimétrico
- (v) Se asume un problema de tipo termoelástico con conducción de calor en estado estacionario
- (vi) El módulo de elasticidad se considera en función de la temperatura y /o radio, lo cual convierte el problema en no homogéneo
- (vii) El módulo de poisson y la constante de expansión térmica se consideran constantes y por lo tanto independientes del radio y/o temperatura
- (viii) Se desprecian las fuerzas de cuerpo debidas al peso de la tubería
- (ix) No se tiene en cuenta la dilatación térmica de la tubería y camisa debido a que el rango de temperatura evaluado es pequeño y a bajas temperaturas para el acero.
- (x) Los efectos de los esfuerzos axiales son poco considerables en relación a los esfuerzos tangenciales y radiales asumiéndose restricción en los extremos y deformación axial cero.



**Figura 38.** Sistema de coordenadas cilíndricas y nomenclatura de esfuerzos, tomado de [38]

Las ecuaciones básicas para la obtención del modelo son las ecuaciones de elasticidad en coordenadas polares que rigen las interacciones entre esfuerzos, desplazamientos y deformaciones[51] donde:

$\sigma_r$ : *esfuerzo radial*

$\sigma_\theta$ : *esfuerzo tangencial*

$\sigma_z$ : *esfuerzo axial*

$\varepsilon_r$ : *deformación radial*

$\varepsilon_\theta$ : deformación tangencial

$\varepsilon_z$ : deformación axial

$u$ : Desplazamiento radial

$u_1$ : Desplazamiento radial tubería de gas

$u_2$ : Desplazamiento radial resina

$u_3$ : Desplazamiento radial camisa

$r$ : Radio

$R_1$ : Radio interno tubería de gas

$R_2$ : Radio externo tubería de gas o radio interno de la capa de resina

$R_3$ : Radio externo de resina o radio interno de la camisa

$R_4$ : Radio externo de la camisa

$A_1, A_2, A_3, C_1, C_2, C_3$ : constantes de lamé

La ecuación de equilibrio en dirección radial es:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (1)$$

Las relaciones desplazamiento deformación son:

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} \quad (2)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad (3)$$

Las relaciones constitutivas de la termoelasticidad en coordenadas polares son[51]:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} ((\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)) + \alpha T) \quad (4)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} ((\sigma_\theta - \nu(\sigma_r + \sigma_z)) + \alpha T) \quad (5)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} ((\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)) + \alpha T) \quad (6)$$

Reorganizando las relaciones constitutivas en función de los esfuerzos se obtiene:

$$\sigma_r = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} ((1-\nu)\varepsilon_r + \nu(\varepsilon_\theta + \varepsilon_z) - \frac{E\alpha T}{1-2\nu}) \quad (7)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} ((1-\nu)\varepsilon_\theta + \nu(\varepsilon_r + \varepsilon_z) - \frac{E\alpha T}{1-2\nu}) \quad (8)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} ((1-\nu)\varepsilon_z + \nu(\varepsilon_r + \varepsilon_\theta) - \frac{E\alpha T}{1-2\nu}) \quad (9)$$

De (ix) asumimos que  $\varepsilon_z = 0$

Reorganizando las ecuaciones

$$\sigma_r = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} ((1-\nu)\varepsilon_r + \nu(\varepsilon_\theta) - \frac{E\alpha T}{1-2\nu}) \quad (10)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} ((1-\nu)\varepsilon_\theta + \nu(\varepsilon_r) - \frac{E\alpha T}{1-2\nu}) \quad (11)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} (\nu(\varepsilon_r + \varepsilon_\theta)) - \frac{E\alpha T}{1-2\nu} \quad (12)$$

Utilizando las relaciones desplazamiento-deformación de las ecuaciones 2 y 3 se obtiene:

$$\sigma_r = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left( (1-\nu) \frac{du}{dr} + \nu \frac{u}{r} \right) - \frac{E\alpha T}{1-2\nu} \quad (13)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left( (1-\nu) \frac{u}{r} + \nu \frac{du}{dr} \right) - \frac{E\alpha T}{1-2\nu} \quad (14)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left( \nu \left( \frac{u}{r} + \frac{du}{dr} \right) \right) - \frac{E\alpha T}{1-2\nu} \quad (15)$$



Reemplazando las ecuaciones 13 y 14 en la ecuación de equilibrio 1 se obtiene la expresión que rige la base para el modelo en mención

$$\begin{aligned} & \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \frac{dE}{dr} \frac{du}{dr} + \frac{\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \frac{dE}{dr} \frac{u}{r} + \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \frac{d^2u}{dr^2} \\ & + \frac{Ev}{(1+\nu)(1-2\nu)} \frac{du}{dr} - \frac{dE}{dr} \frac{\alpha T}{(1-2\nu)} - \frac{dT}{dr} \frac{\alpha E}{(1-2\nu)} + \frac{\frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[ (1-2\nu) \frac{du}{dr} + \frac{u}{r} (2\nu-1) \right]}{r} = 0 \end{aligned}$$

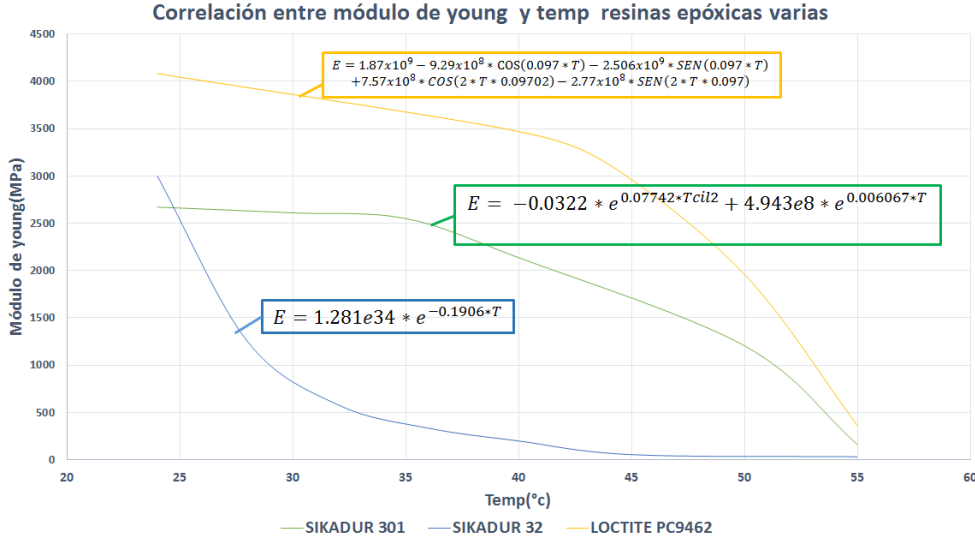
Reorganizando términos y haciendo algunas manipulaciones matemáticas se obtiene la ecuación diferencial que rige el modelo de cálculo del desplazamiento radial para un cilindro con cargas radiales y tangenciales y módulo de elasticidad variable con el radio.

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \left( \frac{1}{E} \frac{dE}{dr} + \frac{\nu}{(1-\nu)} + \frac{1}{r} \frac{(1-2\nu)}{(1-\nu)} \right) \frac{du}{dr} + \left( \frac{1}{E} \frac{\nu}{r(1-\nu)} \frac{dE}{dr} + \frac{\nu}{(1-\nu)} + \frac{1}{r^2} \frac{(2\nu-1)}{(1-\nu)} \right) u = \alpha \frac{(1+\nu)}{(1-\nu)} \left( \frac{T}{E} \frac{dE}{dr} + \frac{dT}{dr} \right) \quad (16)$$

Donde:

Tipo de resina	Expresión matemática	Ajuste(R <sup>2</sup> )
SIKADUR 32	$E = 1.281e34 * e^{-0.1906*T}$	0.99
SIKADUR 301	$E = -0.0322 * e^{0.07742*Tcil2} + 4.943e8 * e^{0.006067*T}$	0.99
LOCTITE PC 9462	$E = 1.87x10^9 - 9.29x10^8 * \cos(0.097 * T) - 2.506x10^9 * \text{SEN}(0.097 * T) + 7.57x10^8 * \cos(2 * T * 0.09702) - 2.77x10^8 * \text{SEN}(2 * T * 0.097)$	0.99
Todas las resinas	$T = \frac{\log(\frac{r}{R2})(T4 - T3)}{\log(\frac{R3}{R2})} + T3$	N/A
Todas las resinas	$\frac{dT}{dr} = \frac{(T3 - T1)}{r * \log(\frac{R3}{R2})}$	N/A

**Tabla 12.** Expresiones experimentales y complementarias del modelo de cálculo de desplazamiento propuesto



**Figura 39.** Curvas Módulo de elasticidad – temperatura con correlación matemática

La expresión para la temperatura proviene de la condición de transferencia de calor por conducción a través de elementos cilíndricos en estado estable[52]. Las ecuaciones que rigen el cálculo de calor, Resistencias, Temperaturas y perfiles de temperatura se detallan a continuación.

$$RES1 = \frac{1}{H_1} \quad (17)$$

$$RES2 = \frac{\log\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{(2*\pi*L*K1)} \quad (18)$$

$$RES3 = \frac{\log\left(\frac{R_3}{R_2}\right)}{(2*\pi*L*K2)} \quad (19)$$

$$RES4 = \frac{\log\left(\frac{R_4}{R_3}\right)}{(2*\pi*L*K3)} \quad (20)$$

$$RES5 = \frac{1}{H_2A} \quad (21)$$

$$RESISTENCIA\ TOTAL = RES1 + RES2 + RES3 + RES4 + RES5 \quad (22)$$

$$CALOR = \frac{(T1-TE)}{RESISTENCIA\ TOTAL} \quad (23)$$

$$T2 = T1 - CALOR * RES1 \quad (24)$$

$$T3 = T1 - CALOR * (RES1 + RES2) \quad (25)$$

$$T4 = T1 - CALOR * (RES1 + RES2 + RES3) \quad (26)$$

$$TCIL1 = \left( \frac{\text{Log}\left(\frac{r1}{R1}\right) * (T3 - T2)}{\text{Log}\left(\frac{R2}{R1}\right)} \right) + T2 \quad (27)$$

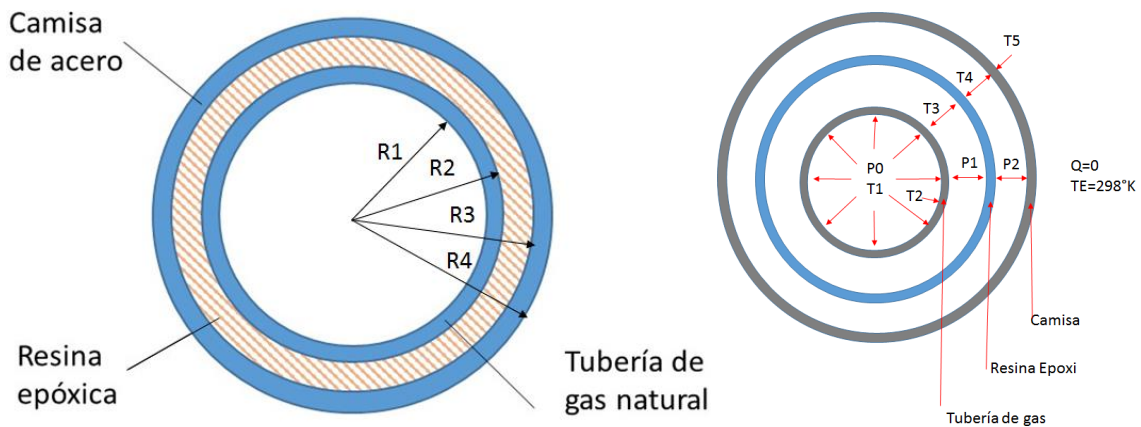
$$TCIL2 = \left( \frac{\text{Log}\left(\frac{r2}{R2}\right) * (T4 - T3)}{\text{Log}\left(\frac{R3}{R2}\right)} \right) + T3 \quad (28)$$

$$TCIL3 = \left( \frac{\text{Log}\left(\frac{r3}{R3}\right) * (T5 - T4)}{\text{Log}\left(\frac{R4}{R3}\right)} \right) + T4 \quad (29)$$

La ecuación (16) es una ecuación diferencial ordinaria de segunda orden no homogénea de coeficientes variables. Este tipo de ecuación no tiene solución analítica debido a la complejidad de sus coeficientes variables. Por lo cual se propuso una solución numérica por diferencias finitas con el método de diferencias centrales. La solución de esta ecuación permite conocer los desplazamientos de la resina a nivel radial ante la acción de la presión y temperatura, y con el desplazamiento se procede a calcular los esfuerzos según las ecuaciones 13-15. El algoritmo de cálculo se presenta en los anexos.

La ecuación diferencial propuesta se soluciona por condiciones de contorno por lo que se requiere conocer los desplazamientos en los extremos de la capa de resina para solucionar.

Para obtener el desplazamiento de los extremos se tendrá en cuenta el supuesto (ii) en el que el contacto entre capas es perfecto por lo tanto en la zona de interferencia entre capas cilíndricas se cumple que:



**Figura 40.** Esquema, dimensiones y variables en cilindros multicapa

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_r(r) = P0 \text{ cuando } r = R1 \\ \sigma_r(r) = P1 \text{ cuando } r = R2 \\ \sigma_r(r) = P2 \text{ cuando } r = R3 \\ \sigma_r(r) = Q \text{ cuando } r = R4 \\ T(r) = T2 \text{ cuando } r = R1 \\ T(r) = T3 \text{ cuando } r = R2 \\ T(r) = T4 \text{ cuando } r = R3 \\ T(r) = T5 \text{ cuando } r = R4 \\ u_1(R2) = u_2(R2) \text{ cond frontera 1} \\ u_2(R3) = u_3(R3) \text{ cond frontera 2} \end{array} \right.$$

*Donde:*

*P0: Presión interna tubería*

*P1: Presión de interferencia entre la tubería y la capa de resina*

*P2: Presión de interferencia entre la capa de resina y la camisa*

*Q: Presión exterior a la camisa (normalmente se asume igual a cero)*

*T1: Temperatura del gas natural*

*T2: Temperatura en el radio interior de la tubería*

*T3: Temperatura en la zona de interferencia entre la tubería y la capa de resina*

*T4: Temperatura en la zona de interferencia entre la capa de resina y la camisa*

*T5: Temperatura en el radio exterior de la camisa*

*TE: Temperatura en el exterior de la camisa*

*Tcil1: Perfil de temperaturas a nivel radial en la tubería*

*Tcil2: Perfil de temperaturas en a nivel radial en la resina*

*Tcil3: Perfil de temperaturas en a nivel radial en la tubería*

*r1: Segmento de radio de la tubería*

*r2: Segmento de radio de la resina*

*r3: Segmento de radio de la camisa*

*H1: Coeficiente de convección gas-pared interna tubería*

*H2: coeficiente de convección camisa –aire exterior*

*K1: Coeficiente de conductividad térmica de la tubería*

*K2: Coeficiente de conductividad térmica de la resina*

*K3: Coeficiente de conductividad térmica de la camisa*

*A: área de transferencia de calor*

*L: longitud de tubería bajo estudio*

*RES1: resistencia térmica por convección entre gas y pared interna tubería*

*RES2: resistencia térmica por conducción a través de la tubería*

*RES3: Resistencia térmica por conducción a través de la resina*

*RES4: Resistencia térmica por conducción a través de la camisa*

*RES5: Resistencia térmica por convección entre la camisa y el medio ambiente*

*RESTOTAL: Resistencia térmica total del sistema de rehabilitación*

*CALOR: Calor que atraviesa el sistema en estado estable*

*u1: desplazamiento radial de la tubería*

*u2: desplazamiento radial de la camisa*

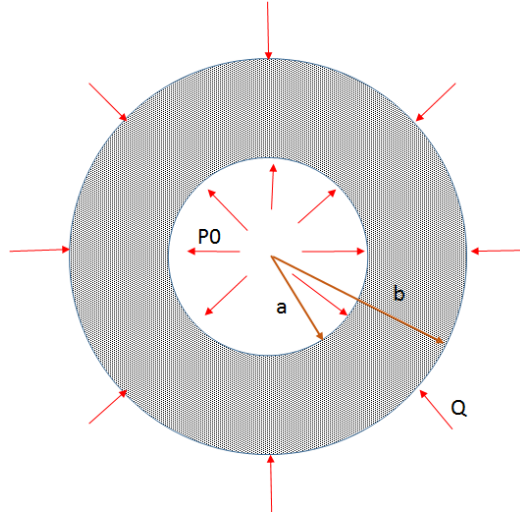
*u3: desplazamiento radial de la camisa*

*a: radio interno de tubería del modelo de lamé*

*b: radio externo de tubería del modelo de lamé*

Para el cálculo de los desplazamientos en la zona de interferencia entre tubería-resina y entre resina - camisa se requiere conocer los desplazamientos de  $u_1$  (R2) y  $u_2$  (R2).

Para obtener los desplazamientos en tubería y camisa se utilizaron las ecuaciones de Lamé, ecuaciones (22-24) teniendo en cuenta que el rango de temperatura estudiado en el presente análisis (25°C-50°C) no genera cambios significativos en las propiedades o dilatación del acero, los valores calculados de esfuerzo y desplazamiento con la teoría de lamé pueden considerarse confiables.



**Figura 41.** Esquema del modelo de Lamé

$$\sigma_r = \frac{a^2 P_0 - b^2 Q}{b^2 - a^2} - \frac{(P_0 - Q) a^2 b^2}{(b^2 - a^2) r^2} \quad (22)$$

$$\sigma_\theta = \frac{a^2 P_0 - b^2 Q}{b^2 - a^2} + \frac{(P_0 - Q) a^2 b^2}{(b^2 - a^2) r^2} \quad (23)$$

$$u = \frac{(1 - \nu)}{E} \frac{(a^2 P_0 - b^2 Q) r}{(b^2 - a^2)} + \frac{(1 + \nu)}{E} \frac{(P_0 - Q) a^2 b^2}{(b^2 - a^2) r} \quad (24)$$

Para el cálculo de los valores del desplazamiento  $u(r)$  ecuación (24) se requiere conocer las presiones de interferencia  $P_1$  y  $P_2$ . Para obtener las presiones de interferencia se hace necesario plantear un sistema de ecuaciones basado en la igualdad de esfuerzos radiales y desplazamientos entre capas por ser un sistema compuesto por 3 capas.

La matriz mostrada a continuación muestra el arreglo de coeficientes que componen el sistema de ecuaciones

$$\begin{bmatrix} A1 & A2 & A3 & C1 & C2 & C3 & P1 & P2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/R1^2 \\ 1/R2^2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/R2^2 \\ 1/R3^2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1/R3^2 \\ 1/R4^2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \beta1 \\ \beta3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ \beta2 \\ \beta4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} CTE \\ -P0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ Q \\ \theta1 \\ \theta2 \end{bmatrix}$$

Donde

$$\beta_1 = \frac{(1-\nu) * (R2^3)}{E2 * (R3^2 - R2^2)} + \frac{(1+\nu) * R2^2 * R3^2}{E2 * (R3^2 - R2^2) * R2} + \frac{(1-\nu) * (R2^3)}{E1 * (R2^2 - R1^2)} + \frac{(1+\nu) * R1^2 * R2^2}{E1 * (R2^2 - R1^2) * R2}$$

$$\beta_2 = \frac{(1-\nu) * (R3^2 * R2)}{E2 * (R3^2 - R2^2)} + \frac{(1+\nu) * R2^2 * R3^2}{E2 * (R3^2 - R2^2) * R2}$$

$$\beta_3 = \frac{(1-\nu) * (R2^3 * R3)}{E2 * (R3^2 - R2^2)} + \frac{(1+\nu) * R2^2 * R3^2}{E2 * (R3^2 - R2^2) * R3}$$

$$\beta_4 = \frac{(1-\nu) * (R3^3)}{E3 * (R4^2 - R3^2)} + \frac{(1+\nu) * R3^2 * R4^2}{E3 * (R4^2 - R3^2) * R3} + \frac{(1-\nu) * (R3^3)}{E2 * (R3^2 - R2^2)} + \frac{(1+\nu) * R2^2 * R3^2}{E2 * (R3^2 - R2^2) * R3}$$

$$\theta_1 = P_0 * \left[ \frac{(1-\nu) * (R1^2 * R2)}{E1 * (R2^2 - R1^2)} + \frac{(1+\nu) * R1^2 * R2^2}{E1 * (R2^2 - R1^2) * R2} \right]$$

$$\theta_2 = \frac{(1-\nu) * (R4^2 * R3)}{E1 * (R4^2 - R3^2)} + \frac{(1+\nu) * R3^2 * R4^2}{E3 * (R4^2 - R3^2) * R3}$$

## 5.2. Modelo analítico para el cálculo de esfuerzos en cilindro con módulo de elasticidad variable y efecto viscoelástico lineal(creep)

El modelo desarrollado a continuación se basa en una solución derivada de la solución analítica generalizada para el cálculo de esfuerzos en cilindros huecos donde se incluye el efecto del tiempo por considerarse que la resina epóxica puede presentar un comportamiento viscoelástico debido a la temperatura. Los siguientes supuestos se tienen en cuenta para la definición del modelo.

- (i) El material de cada capa de cilindro es isotrópico
- (ii) Todas las capas de cilindro son perfectamente ajustadas y no existen tolerancias o vacíos entre ellas
- (iii) La deformación satisface la ley de Hooke y la teoría de las pequeñas deformaciones

- (iv) Todas las variables son asumidas como dependientes del radio por tratarse de un problema de tipo axisimétrico
- (v) Se asume un problema de tipo termoviscoelástico con conducción de calor en estado estacionario
- (vi) El cálculo de las deformaciones se basa en el modelo simplificado de viscoelasticidad lineal de maxwell
- (vii) El módulo de elasticidad se considera en función de la temperatura y /o radio, lo cual convierte el problema en no homogéneo
- (viii) El módulo de poisson y la constante de expansión térmica se consideran constantes y por lo tanto independientes del radio y/o temperatura
- (ix) Se desprecian las fuerzas de cuerpo debidas al peso de la tubería y se asume tubería enterrada
  - (x) Los efectos de los esfuerzos axiales son poco considerables en relación a los esfuerzos tangenciales y radiales asumiéndose restricción en los extremos y deformación axial cero.
- (xi) Se desprecia la expansión térmica del acero dentro del rango de 35°C-55°C

Los polímeros hacen parte de los materiales que a ciertas temperaturas pueden modelarse por medio de la teoría de viscoelasticidad lineal sin cometer grandes desviaciones en los cálculos[53].

El presente modelo busca determinar el efecto del tiempo sobre los esfuerzos y deformaciones en la resina epóxica. Para este fin se presume un comportamiento de deformación por creep basado en el modelo de viscoelasticidad lineal de maxwell, el cual se basa en que un material presenta de forma aditiva o en serie el efecto elástico más el efecto viscoso sobre la deformación del mismo[54]. El modelo reológico se precisa en la siguiente figura



**Figura 42.** Modelo reológico del creep en estado estable con deformación elástica añadida, tomado de [54]

El modelo de maxwell para la deformación lineal establece que la deformación total de un cuerpo por acción de un esfuerzo constante se deriva de la suma de la deformación elástica del material más la deformación viscosa. Esto se aprecia en la siguiente definición

$$\epsilon_T = \epsilon_e + \epsilon_v \quad (1)$$

Donde:

$\epsilon_T = \text{deformación total}$



$\varepsilon_e = \text{deformación elástica}$

$\varepsilon_v = \text{deformación viscosa}$

Maxwell define cada deformación de la siguiente manera:

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E} \quad y \quad \varepsilon_v = \frac{\sigma^* t}{\eta} \quad (2)$$

$$\varepsilon_T = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma^* t}{\eta} \quad (3)$$

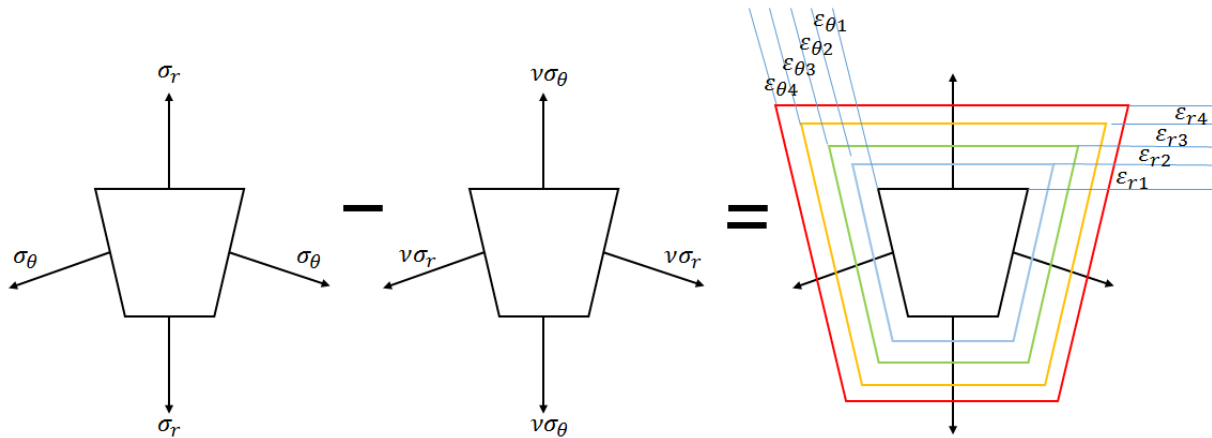
Donde

$\eta$ : viscosidad del material

$\sigma$ : esfuerzo constante

$t$ : tiempo

Teniendo en cuenta que la definición de maxwell es uniaxial cartesiana se hace necesario transformar el mismo concepto para el problema del cilindro, para lo cual es conveniente el siguiente diagrama



**Figura 43.** Esquema de deformaciones en modelo visco elástico propuesto.

En el diagrama se aprecia el efecto directo de los esfuerzos radiales y tangenciales sobre la deformación así como el efecto de Poisson sobre las deformaciones en sentido radial y tangencial.

En condiciones de elasticidad pura la expresión para las deformaciones en coordenadas polares serían

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_r}{E} - \frac{\nu \sigma_\theta}{E} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{\sigma_{\theta}}{E} - \frac{\nu\sigma_r}{E} \quad (5)$$

En ambos casos el primer término del lado derecho corresponde a la deformación causada por el esfuerzo que incide normalmente sobre el área y el segundo término corresponde a la corrección en deformación causada por el efecto de poisson.

Al incluir el efecto visco elástico, cada esfuerzo más su corrección por poisson tendrá un efecto en la deformación por creep, las cuales siguiendo la lógica del diagrama descrito en la figura 33 por acción aditiva serían así:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{r1} + \varepsilon_{r2} + \varepsilon_{r3} + \varepsilon_{r4} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{\theta} = \varepsilon_{\theta1} + \varepsilon_{\theta2} + \varepsilon_{\theta3} + \varepsilon_{\theta4} \quad (7)$$

Donde:

$$\varepsilon_{r1} = \frac{\sigma_r}{E} : \text{Deformación radial elástica debida al esfuerzo radial}$$

$$\varepsilon_{r2} = \frac{\sigma_r t}{\eta} : \text{Deformación radial viscosa causada por esfuerzo radial}$$

$$\varepsilon_{r3} = \frac{\nu\sigma_{\theta}}{E} : \text{Deformación radial elástica debida a la corrección de poisson}$$

$$\varepsilon_{r4} = \frac{\nu\sigma_{\theta} t}{\eta} : \text{Deformación radial viscosa debida a la corrección de poisson}$$

$$\varepsilon_{\theta1} = \frac{\sigma_{\theta}}{E} : \text{Deformación tangencial elástica debida al esfuerzo tangencial}$$

$$\varepsilon_{\theta2} = \frac{\sigma_{\theta} t}{\eta} : \text{Deformación tangencial viscosa debida al esfuerzo tangencial}$$

$$\varepsilon_{\theta3} = \frac{\nu\sigma_r}{E} : \text{Deformación tangencial elástica debida a la corrección de poisson}$$

$$\varepsilon_{\theta4} = \frac{\nu\sigma_r t}{\eta} : \text{Deformación tangencial viscosa debida a la corrección de poisson}$$

Al organizar las expresiones anteriores e incluir la deformación térmica se obtiene el modelo termo-viscoelástico de deformaciones para el caso de deformación en el plano

$$\varepsilon_r = \sigma_r * \left( \frac{1}{E} + \frac{t}{\eta} \right) - \sigma_\theta * \left( \frac{\nu}{E} + \frac{\nu t}{\eta} \right) + \alpha T \quad (8)$$

$$\varepsilon_\theta = \sigma_\theta * \left( \frac{1}{E} + \frac{t}{\eta} \right) - \sigma_r * \left( \frac{\nu}{E} + \frac{\nu t}{\eta} \right) + \alpha T \quad (9)$$

Llamando a  $\varphi = \left( \frac{1}{E} + \frac{t}{\eta} \right)$  ;  $\gamma = \left( \frac{\nu}{E} + \frac{\nu t}{\eta} \right)$

$$\varepsilon_r = \varphi \sigma_r - \gamma \sigma_\theta + \alpha T \quad (10)$$

$$\varepsilon_\theta = \varphi \sigma_\theta - \gamma \sigma_r + \alpha T \quad (11)$$

Reorganizando las expresiones se obtienen las ecuaciones del modelo termo-viscoelastico para los esfuerzos en el plano:

$$\sigma_\theta = \beta \varepsilon_\theta + \frac{\gamma}{\varphi} \beta \varepsilon_r - \beta \alpha T \left( \frac{\gamma}{\varphi} + 1 \right) \quad (12)$$

$$\sigma_r = \frac{\gamma}{\varphi} \beta \varepsilon_\theta + \left( \frac{1}{\varphi} + \frac{\gamma^2}{\varphi^2} \beta \right) \varepsilon_r - \left( \left( \frac{\gamma^2}{\varphi^2} + \frac{\gamma}{\varphi} \right) \beta + \frac{1}{\varphi} \right) \alpha T \quad (13)$$

Donde  $\beta = \left( \varphi - \frac{\gamma^2}{\varphi} \right)^{-1}$

La ecuación de equilibrio en dirección radial es:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (14)$$

Las relaciones desplazamiento - deformación son:

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} \quad (15)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad (16)$$

Al introducir las ecuaciones 12 y 13 en la ecuación de equilibrio y usar las relaciones desplazamiento –deformación de las ecuaciones 15 y 16 se obtiene la ecuación diferencial que rige el cálculo de los desplazamientos en dirección radial.

Al realizar las respectivas simplificaciones y manipulaciones matemáticas se obtiene la siguiente ecuación diferencial

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \delta \frac{du}{dr} + \zeta u = \rho \quad (17)$$

Donde:

$$\delta = \theta * \left( \frac{\beta}{r} * \frac{\gamma}{\varphi} - \frac{1}{\varphi^2} * \frac{\partial \varphi}{\partial r} + 2 * \frac{\partial \gamma}{\partial r} * \frac{\gamma \beta}{\varphi^2} + \frac{\partial \beta}{\partial r} * \frac{\gamma^2}{\varphi^2} - 2 * \frac{\gamma^2 \beta}{\varphi} * \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \left( \frac{1}{\varphi} + \frac{\gamma^2}{\varphi^2} \right) * \frac{1}{r} - \frac{\gamma \beta}{\varphi} * \frac{1}{r} \right)$$

$$\zeta = \theta * \left( \frac{\partial \beta}{\partial r} * \frac{\gamma}{\varphi} * \frac{1}{r} - \frac{\beta * \gamma}{\varphi * r^2} + \frac{1}{\varphi} * \frac{\beta}{r} * \frac{\partial \gamma}{\partial r} - \frac{\beta}{r} * \frac{\gamma}{\varphi^2} * \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\gamma}{\varphi} * \frac{\beta}{r^2} - \frac{\beta}{r^2} \right)$$

$$\rho = \theta * \alpha * T * \left( -\frac{1}{\gamma^2} * \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\partial \beta}{\partial r} * \left( \frac{\gamma^2}{\varphi^2} + \frac{\gamma}{\varphi} \right) + \beta * \left( \frac{2\gamma}{\varphi^2} \frac{\partial \gamma}{\partial r} - 2 * \frac{\gamma^2}{\varphi^3} * \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{\varphi} * \frac{\partial \gamma}{\partial r} - \frac{\gamma}{\varphi^2} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) - \left( \frac{\gamma}{\varphi} + 1 \right) * \frac{\beta}{r} + \left( \beta * \left( \frac{\gamma^2}{\varphi^2} + \frac{\gamma}{\varphi} \right) + \frac{1}{\varphi} \right) \right) + \alpha * \theta * \frac{\partial T}{\partial r} * \left( \beta * \left( \frac{\gamma^2}{\varphi^2} + \frac{\gamma}{\varphi} \right) + \frac{1}{\varphi} \right)$$

$$\theta = \left( \frac{1}{\varphi} + \frac{\gamma^2}{\varphi^2} * \beta \right)^{-1}$$

La ecuación 17 corresponde a una ecuación diferencial ordinaria no homogénea de segundo grado con coeficientes variables. Los coeficientes de la ecuación 17 contienen de forma implícita el efecto del tiempo y las propiedades elásticas y viscosas.

La ecuación 17 es solucionada numéricamente por diferencias finitas por el método de diferencias centradas y para su solución se desarrolló un algoritmo en matlab. Como resultado de la solución de la ecuación 17, se obtiene un vector solución para el desplazamiento el cual corresponde a la combinación de presión, temperatura, tiempo, geometría y demás propiedades viscosas y elásticas.

## 6. ANALISIS DE RESULTADOS MODELOS ANALÍTICOS

### 6.1. Resultados análisis modelo analítico para el cálculo de esfuerzos en cilindros multicapa con variación del módulo de Young con la temperatura

Los resultados del análisis se presentan en varias etapas, inicialmente se presenta una evaluación general del sistema de rehabilitación acoplado y posteriormente se presentan análisis de la tubería y la resina los cuales son los elementos más sensibles de la cadena. La camisa no requiere análisis detallado pues los esfuerzos nunca llegan a niveles significativos.

Una segunda parte del análisis presenta los mapas de esfuerzo equivalente obtenidos en función del espesor y la temperatura a una presión de operación fija y en función de la presión y la temperatura a un espesor fijo, con el fin de determinar las zonas de operación críticas.

Las propiedades mecánicas del acero de la tubería y la camisa, y las constantes térmicas[55] y geométricas se detallan a continuación:

Tubería	Límite Elástico (psi)		Resistencia última (psi)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
SAW API5LX42 X0.25"X10-3/4"	42000	72000	60000	110000

**Tabla 13.** Propiedades mecánicas tubería de transporte gas

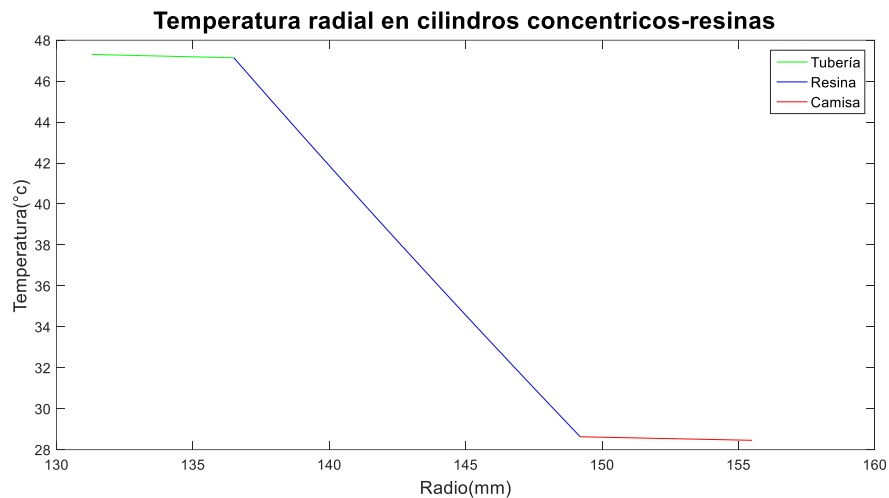
H1(W/M2K)	H2(W/M2K)	K1(W/M2K)	K1(W/M2K)	K1(W/M2K)	A(M2)	L(M)	R1(mm)	R2(mm)	R3(mm)	R4(mm)	P0(Mpa)	PE(Mpa)	T1(K)	TE(K)
40	15	50	1	50	1	1	133.3	136.5	149.2	155.5	5.87	0	323	297

**Tabla 14.** Constantes térmicas y geométricas del sistema de rehabilitación utilizada en la evaluación

#### 6.1.1. Valoración general sistema de rehabilitación

La figura 43 presenta la distribución de temperatura en dirección radial a lo largo del sistema de rehabilitación. Se observa que tanto en camisa como en tubería la temperatura es prácticamente constante mientras que el cambio de temperatura es asumido casi en su totalidad por la resina. Esto se debe a que la relación entre conductividad térmica entre acero y resina epóxica es de aproximadamente 50 a 1, lo que muestra que la resina se comporta en la práctica como un aislante. Este hecho da las bases para considerar que al menos el cilindro

de resina deba ser considerado como un cilindro de pared gruesa, ya que debido a la alta variación del módulo de Young con la temperatura, los perfiles de esfuerzos cambian significativamente en la resina y la simplificación por cilindro de pared delgada no aplica.

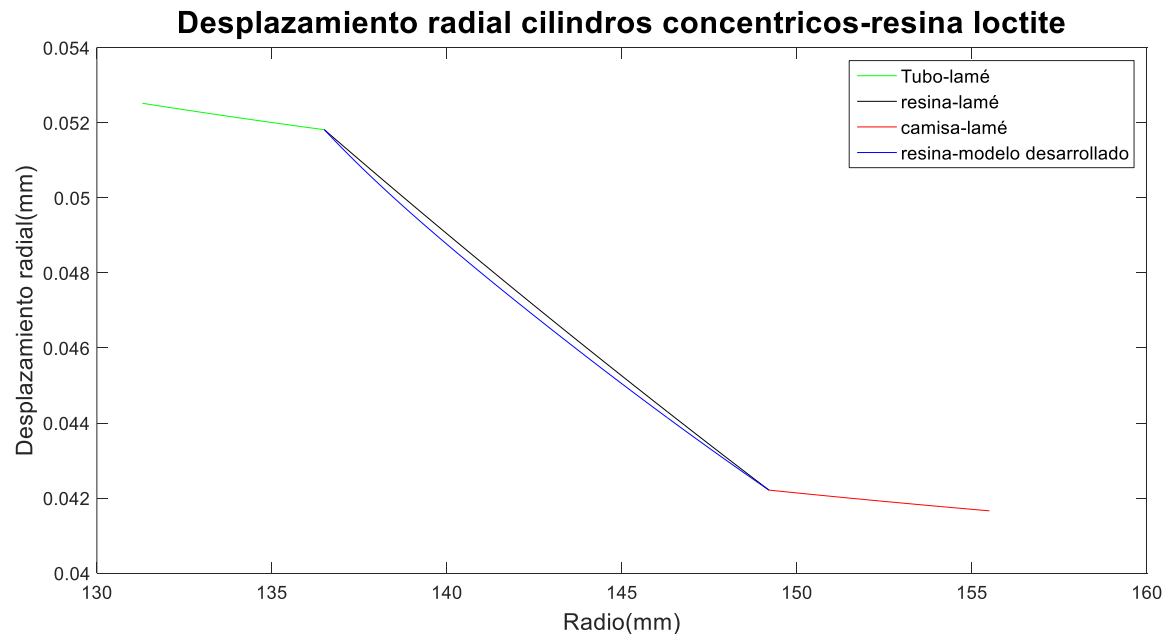


**Figura 44.** Cambio de temperatura en dirección radial en el sistema de rehabilitación para rango en extremos de (320-301°K)

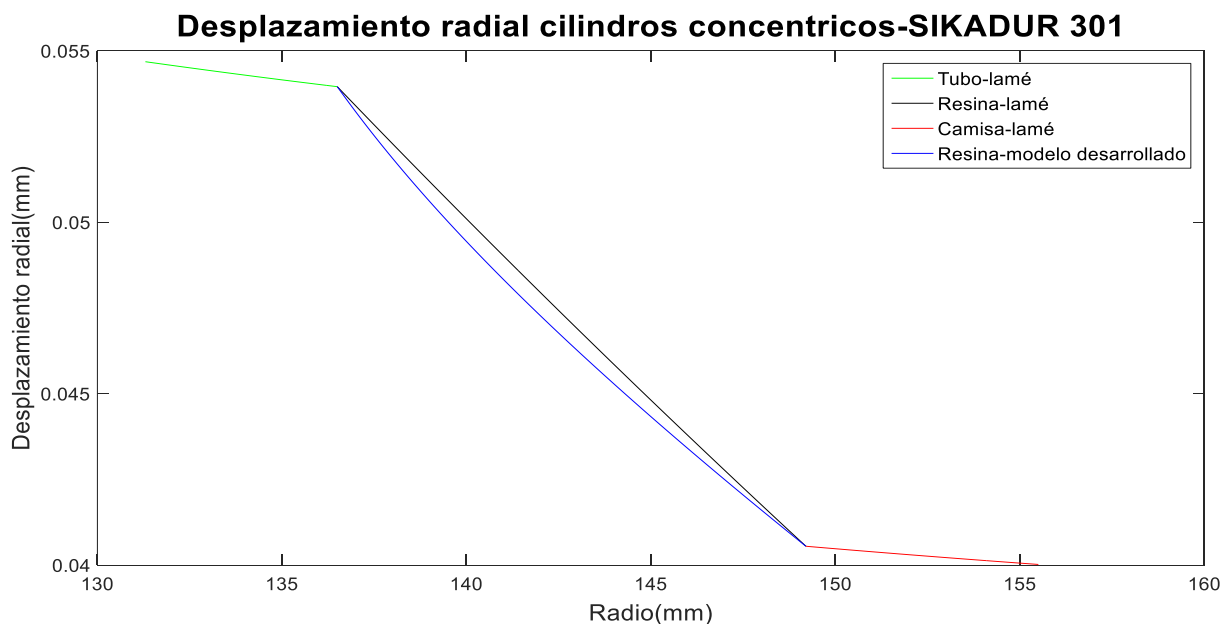
Las figuras 45,46 y 47 representan el desplazamiento radial del sistema de rehabilitación por acción de la presión interna y la temperatura del sistema para refuerzos con 3 tipos de resinas epóxicas. En la zona central de las gráficas se aprecia el desplazamiento que sufre la resina y se presenta el desplazamiento calculado por la teoría de lamé en la cual el cuerpo se considera homogéneo (módulo de elasticidad constante) y el desplazamiento calculado con el modelo propuesto en el que se incluye el efecto de la temperatura sobre la variación radial del módulo de Young. Al comparar las 3 gráficas se aprecia una clara tendencia en los sistemas con resina Loctite y sikadur 301 a alinearse con el desplazamiento calculado por la teoría de lamé, esto básicamente gracias a que estas resinas conservan mejor los valores de rigidez ante cambios de temperatura. Por otro lado la resina Sikadur 32 muestra la mayor desviación respecto al desplazamiento calculado según lamé, esto debido a la alta disminución de rigidez de esta resina ante los aumentos de temperatura. La figura 37 permite observar que las fibras de resina más cercanas al contacto con la tubería presentan un apiñamiento mientras que cerca de la mitad del espesor de la resina se produce una tendencia al aumento del desplazamiento a lo largo del radio. Esto es debido a que la zona de contacto con la tubería se encuentra a mayor temperatura y por ende es menos rígida.

Se aprecia que los mayores niveles de desplazamiento radial se producen en el sistema de rehabilitación que utiliza sikadur 32 con niveles máximos superiores a las 72 micras y los menores niveles en el sistema que utiliza Loctite con niveles máximos de 52 micras. Es interesante notar que los niveles de aplastamiento por esfuerzo radial en tubería se presentan en los sistemas con la resina más rígida, en este caso la loctite PC9462, esto se evidencia en la

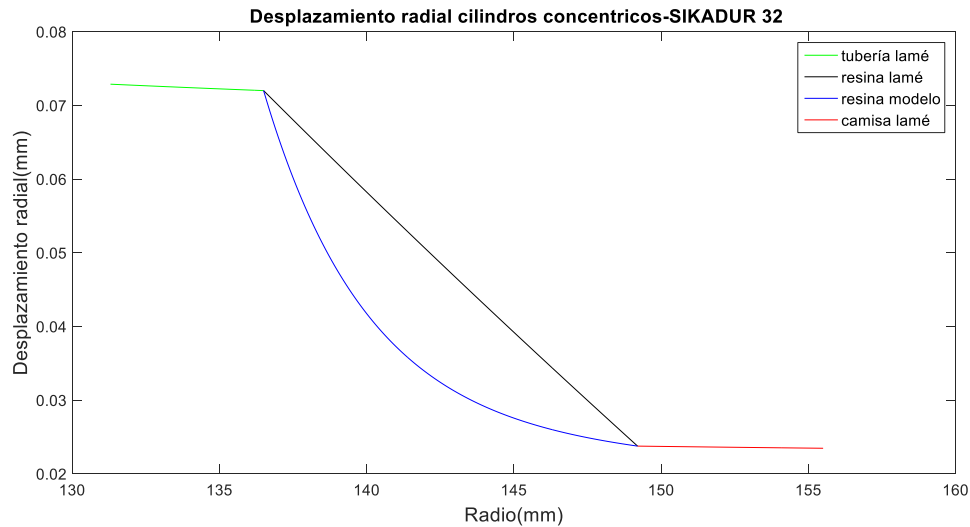
mayor pendiente de desplazamientos en la tubería en el sistema de rehabilitación con resina loctite respecto al sistema de rehabilitación con resina sikadur 32 donde la pendiente de desplazamientos en la tubería es prácticamente nula. Es importante destacar que el aumento de nivel de aplastamiento en la tubería es señal de menores niveles de tensión tangencial lo cual es de beneficio para la tubería de gas.



**Figura 45.** Variación del desplazamiento radial con el radio en el sistema de rehabilitación-resina Loctite PC 9462 (320-301°K)

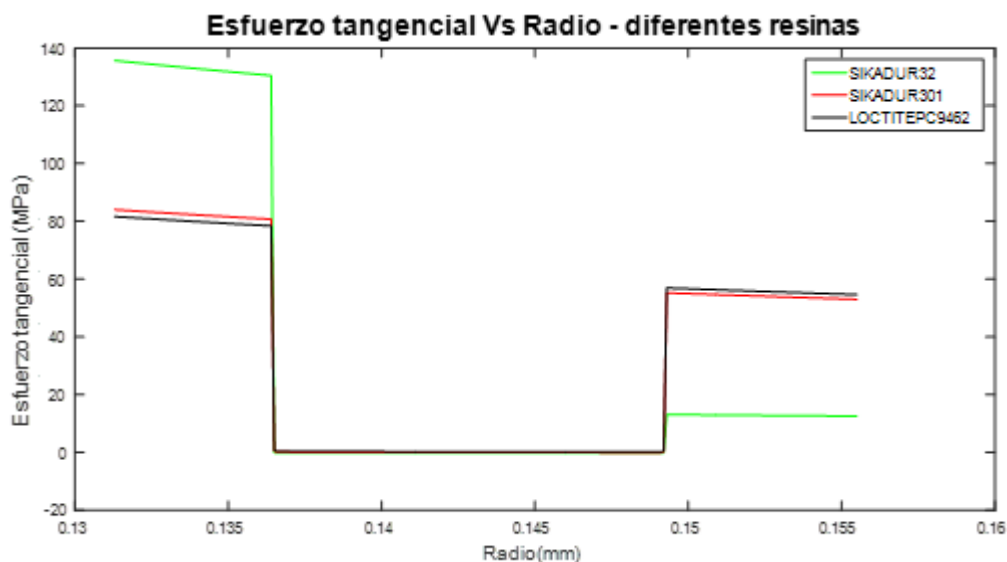


**Figura 46.** Variación del desplazamiento radial con el radio en el sistema de rehabilitación-resina SIKADUR 301 (320-301°K)



**Figura 47.** Variación del desplazamiento radial con el radio en el sistema de rehabilitación-resina SIKADUR 32 (320-301°K)

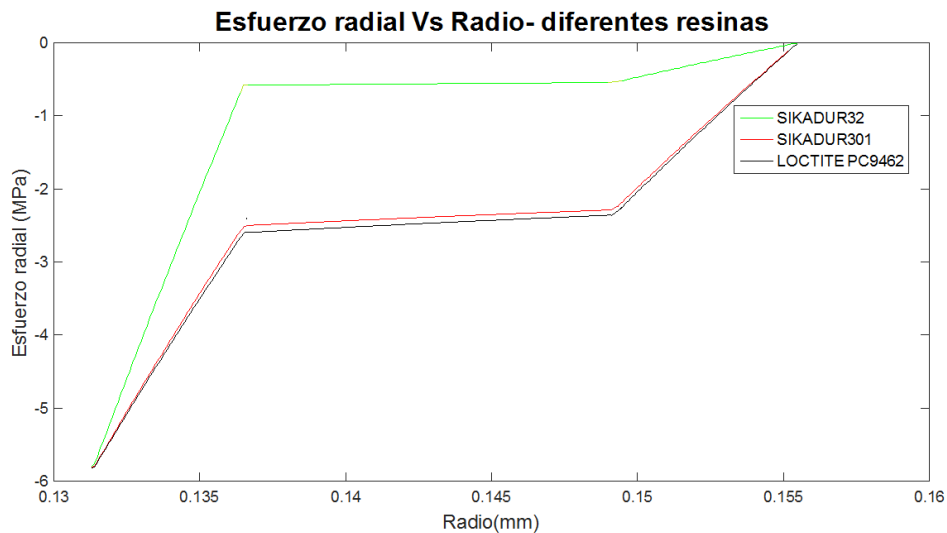
La figura 48 permite observar la relación de distribución de esfuerzos tangenciales a lo largo del sistema de rehabilitación para 3 escenarios con diferentes resinas como refuerzo. El comparativo permite concluir que los sistemas con sikadur 32 como refuerzo generan los mayores niveles de esfuerzo tangencial en la tubería (ala izquierda más alta) y la menor transmisión de esfuerzo hacia la camisa (ala derecha más baja). Mientras que la condición inversa se presenta con la resina loctite donde se observa la mayor transmisión de esfuerzos tangenciales hacia la camisa y por ende los menores esfuerzos tangenciales en la tubería, lo cual es en si el objetivo de un sistema de rehabilitación de tipo camisa.



**Figura 48.** Comparativo de la relación de distribución de esfuerzos tangenciales a lo largo del sistema de rehabilitación ante el uso de diferentes resinas como elemento de refuerzo (320-301°K)



La figura 49 muestra la distribución de esfuerzos radiales a lo largo del sistema de rehabilitación para diferentes resinas como refuerzo. De manera análoga al caso anterior se establece una mayor absorción de esfuerzos radiales en la tubería cuando se utiliza resina sikadur 32 y una menor absorción de esfuerzos radiales por parte de la camisa, el caso contrario se observa con la resina loctite.

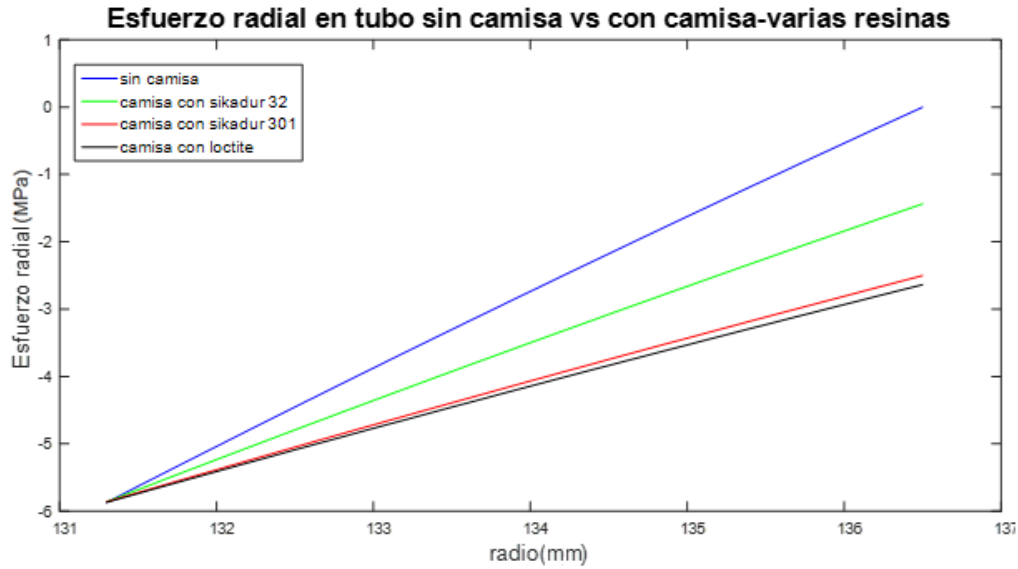


**Figura 49.** Comparativo de la relación de distribución de esfuerzos radiales a lo largo del sistema de rehabilitación ante el uso de diferentes resinas como elemento de refuerzo (320-301°K)

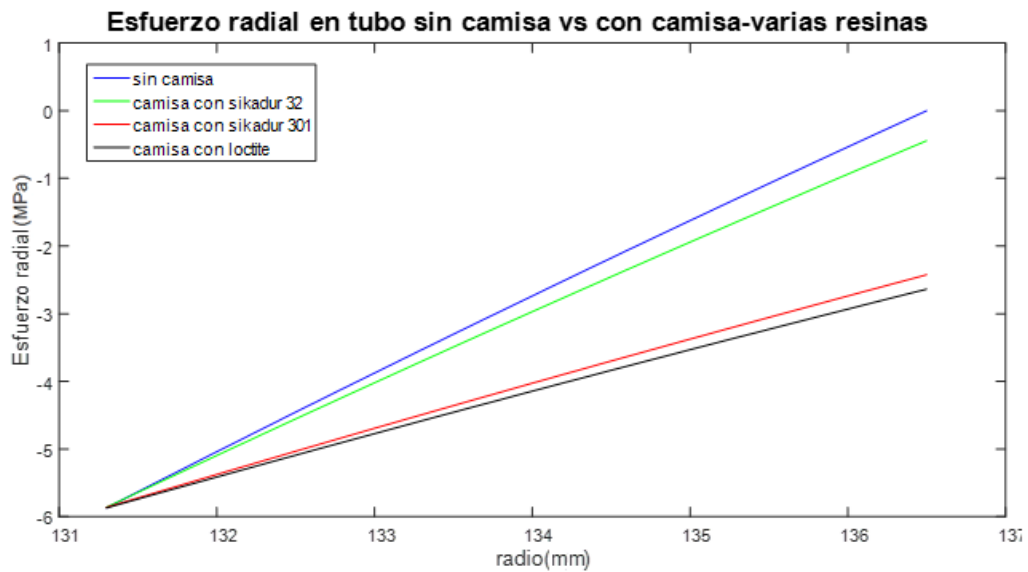
### 6.1.2. Valoración esfuerzos y desplazamiento tubería transporte de gas

Las figuras 50 y 51 representan el efecto que tienen los diferentes tipos de resina epóxica sobre la distribución de esfuerzos radiales en la tubería de gas natural ante dos escenarios de temperatura promedio de la resina. Vale destacar que en este caso el valor promedio de la temperatura en las resinas es preponderante, pues los desplazamientos radiales de la tubería son afectados por el promedio de rigidez de la resina y la camisa más que por la distribución de temperatura a lo largo de la resina.

Las figuras 50 y 51 permiten definir que los aumentos en la temperatura promedio de la resina epóxica (aumento de 8°C para el caso en mención), generan una tendencia hacia un estado de esfuerzos similar al presentado en una tubería sin camisa, este efecto se puede observar fácilmente en la resina SIKADUR 32, donde el perfil de esfuerzos de la tubería con sistema de rehabilitación instalado es muy similar al perfil de esfuerzos de una tubería sin refuerzo por camisa. Las resinas sikadur 301 y loctite evidencian en mucha menor escala este efecto.

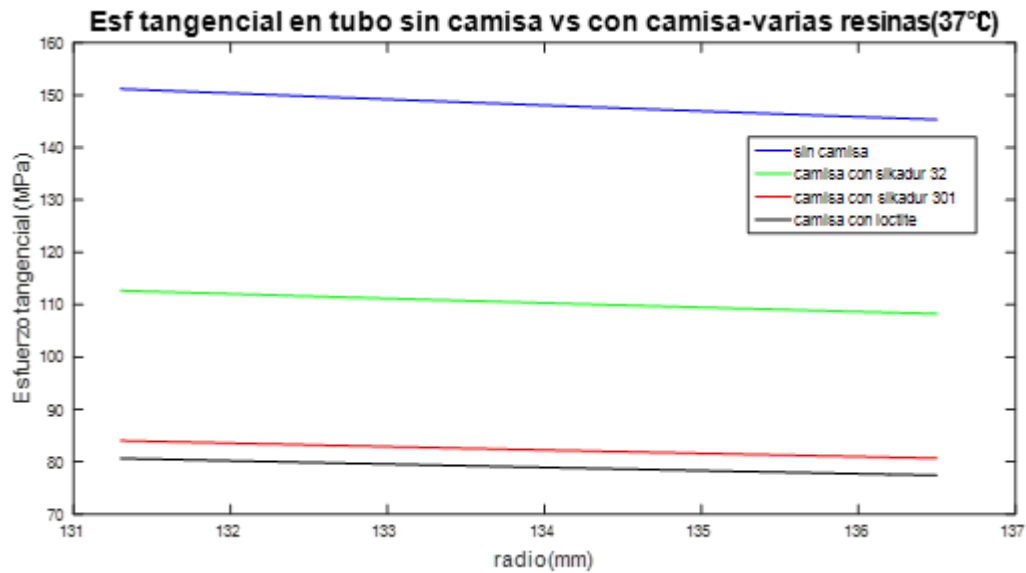


**Figura 50.** Efecto del tipo de resina sobre la distribución de esfuerzos radiales en la tubería en comparación con un tubo sin camisa temperatura promedio de resina de 310°K

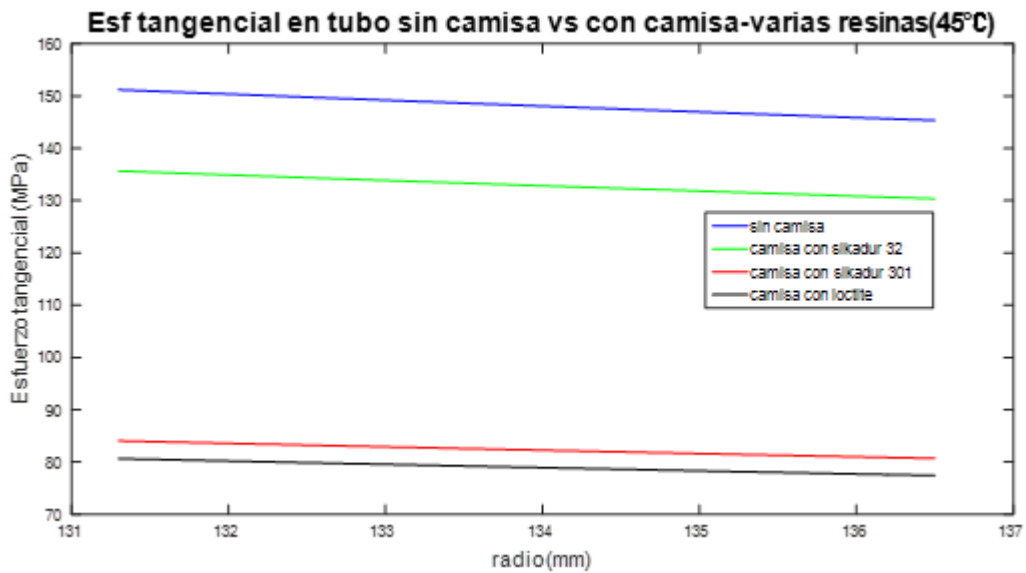


**Figura 51.** Efecto del tipo de resina sobre la distribución de esfuerzos radiales en la tubería en comparación con un tubo sin camisa con temperatura promedio de resina de 318°K

De manera análoga al caso anterior, el aumento de temperatura promedio de la resina genera tendencias hacia un estado de esfuerzos tangenciales en la tubería con refuerzo similares a los presentados en una tubería sin camisa. Se aprecia que con 8 grados de aumento de temperatura los esfuerzos tangenciales en la tubería aumentan en un 30% aproximadamente cuando se utiliza la resina Sikadur 32. Un 3% en el caso de la sikadur 301 y de forma despreciable con la Loctite pc9462



**Figura 52.** Efecto del tipo de resina sobre la distribución de esfuerzos tangenciales en la tubería en comparación con un tubo sin camisa con temperatura promedio de resina de 310°K



**Figura 53.** Efecto del tipo de resina sobre la distribución de esfuerzos tangenciales en la tubería en comparación con un tubo sin camisa con temperatura promedio de resina de 318°K

Si definimos la efectividad del sistema de refuerzo como el porcentaje de disminución de esfuerzos en la tubería cuando se instala una camisa vs el esfuerzo que tendría sin camisa, la forma de calcularlo sería:

$$\% Ef SR = \left( \frac{Esf tub SC - Esf tub CC}{Esf tub SC} \right) * 100$$

Donde:

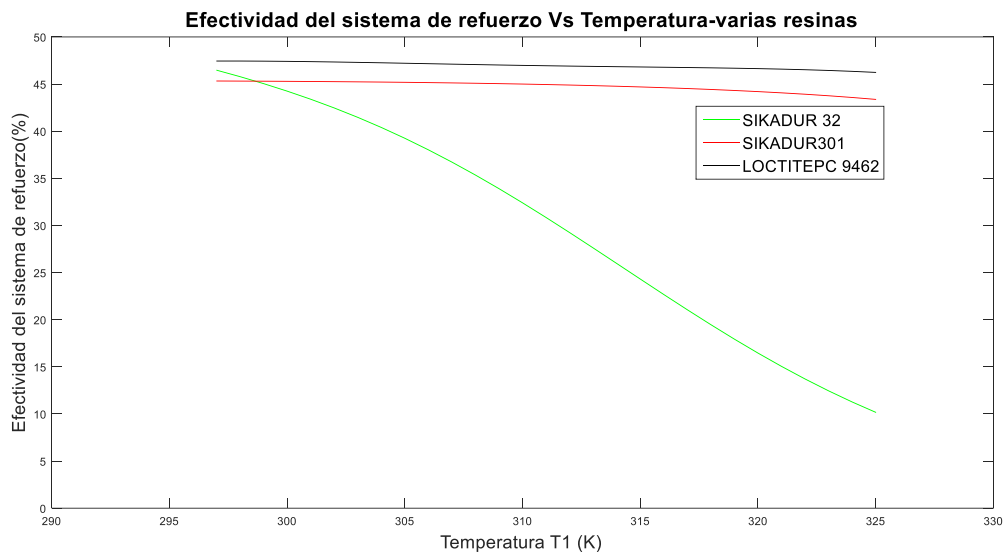
*% Ef SR: Efectividad del sistema de refuerzo(%)*

*Esf tub SC: Esfuerzo en tubería sin camisa*

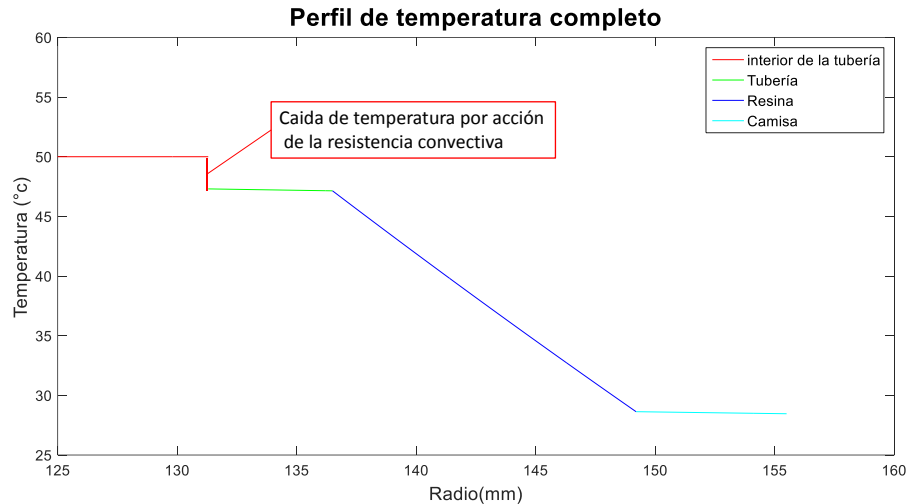
*Esf tub CC: Esfuerzo en tubería con camisa*

El concepto de efectividad del sistema de refuerzo permite comparar de manera objetiva el cumplimiento del proposito de los sistemas de rehabilitación y refuerzo.

En la figura 54 se aprecia la variación de la efectividad de los sistemas de refuerzo ante cambios en la temperatura del gas natural. Se aprecia que en el caso de la resina sikadur 32 la efectividad es afectada significativamente por el aumento de temperatura del gas natural, mientras que la efectividad de los sistemas de refuerzo con loctite y sikadur 301 disminuyen en muy poca proporción. La explicación de este hecho está en que la temperatura que afecta la resina tiende a ser inferior a la del gas natural debido a la caída de temperatura a causa de la resistencia convectiva como se aprecia en la figura 54



**Figura 54.** Efectividad del sistema de refuerzo Vs Temperatura del Gas

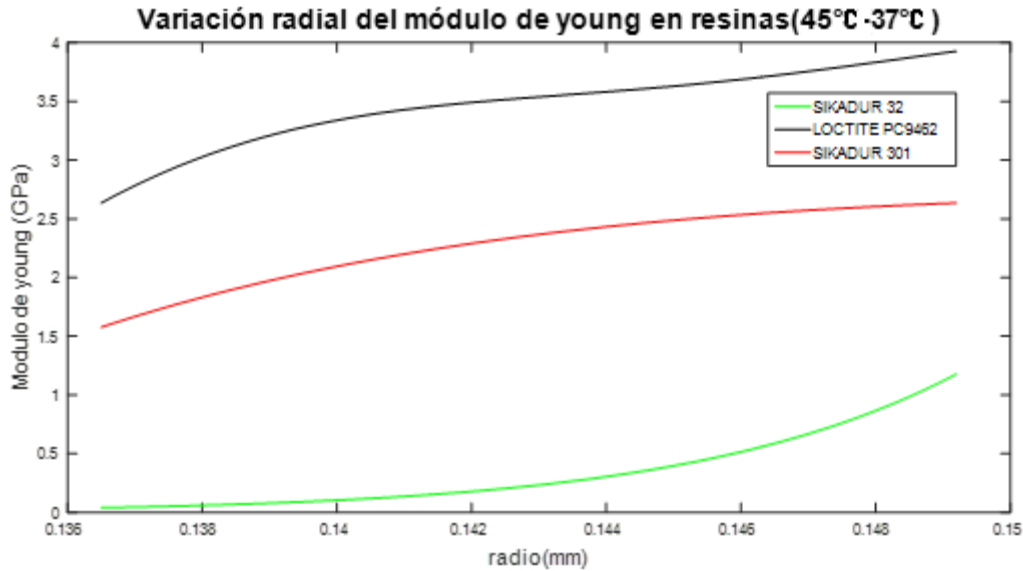


**Figura 55.** Detalle de la caída de temperatura por acción de la resistencia convectiva al interior de la tubería de gas natural

### 6.1.3. Valoración de esfuerzos y desplazamientos en refuerzo de resina epóxica

La figura 56 muestra un claro comportamiento no lineal en el módulo de Young respecto al radio. Este tipo de perfiles de variación de rigidez dista mucho de los perfiles analizados por los modelos analíticos de materiales del tipo FGM's, como el desarrollado por jabbari[50] en los cuales se utilizan principalmente relaciones de potencia(power-law) entre módulo de Young y el radio. Este es uno de los principales aspectos diferenciadores del modelo propuesto en esta investigación.

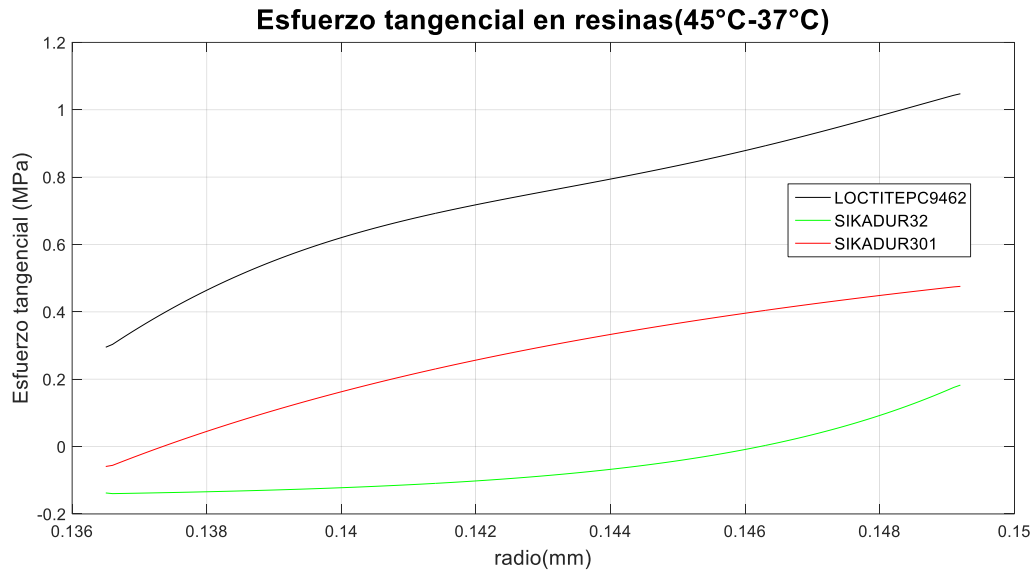
Es importante destacar que a mayor intervalo de temperatura entre capa interna y capa externa de la resina, mayor es la no linealidad en la relación entre el módulo de Young y el radio, lo cual aplica para todas las resinas estudiadas.



**Figura 56.** Comparativo de la variación radial del módulo de Young por efecto de la temperatura en diferentes resinas (320°K-301°K)

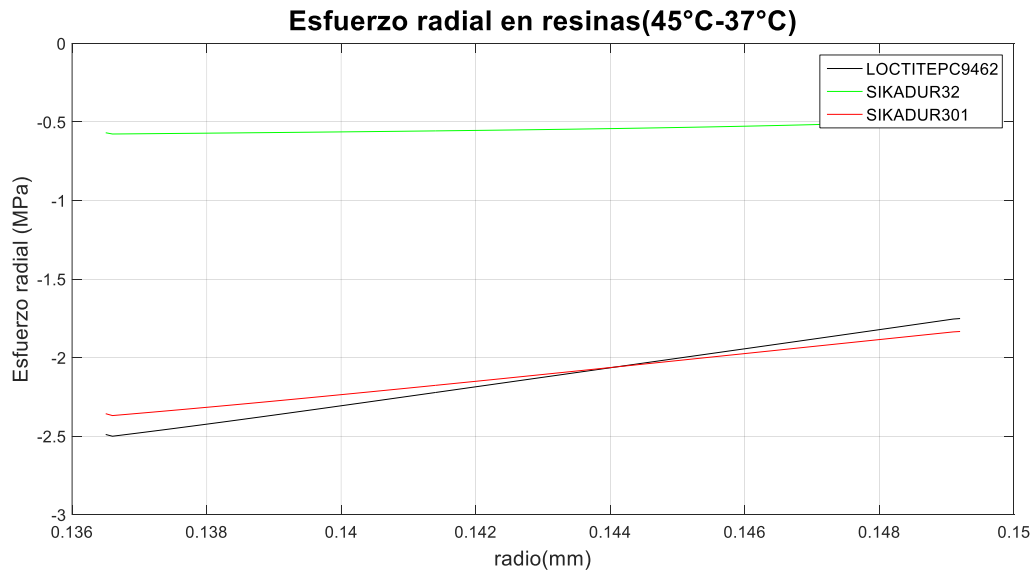
La figura 57 presenta el comparativo de comportamiento de los esfuerzos tangenciales a lo largo del radio en las 3 resinas estudiadas. Se observa que los mayores valores de esfuerzo tangenciales los absorbe la resina loctite PC9462 y la de menores valores la resina sikadur 32. Este comportamiento se explica desde la mayor rigidez de la resina loctite, lo que significa que gracias a la mayor rigidez de la resina loctite, esta absorbe parte de los esfuerzos tangenciales que transmite la tubería y de esta manera alivia en parte a la tubería.

Otro aspecto interesante que se representa en la figura 57 es el hecho de que se aprecian esfuerzos tangenciales a tensión y a compresión en las resinas sikadur 32 y sikadur 301, principalmente en la sikadur 32. La existencia de esfuerzos tangenciales contrarios en la resina favorece el aumento de esfuerzos cortantes que inducen al fenómeno de delaminación. La visualización de este tipo de efectos refuerza la importancia del desarrollo del presente modelo.



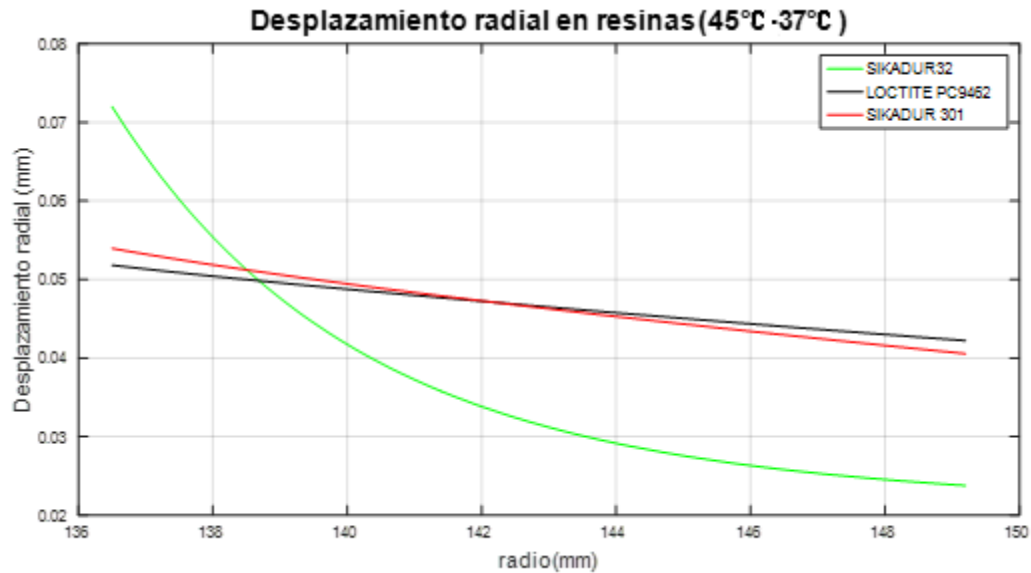
**Figura 57.** Comparativo de la variación del esfuerzo tangencial en diferentes resinas (320°K-301°K)

De manera análoga al caso tangencial ocurre con los esfuerzos radiales en las resinas, sin embargo el comportamiento radial es mucho más lineal aun con el aumento de la temperatura.



**Figura 58.** Comparativo de la variación del esfuerzo radial en diferentes resinas (320°K-301°K)

La figura 59 permite ver en detalle que la resina loctite pc9462 posee la menor pendiente de desplazamiento radial lo cual está relacionado con mayores niveles de homogeneidad en su estructura interna, esto se traduce en menor concentración de material en la zona cercana al contacto con la tubería de gas.



**Figura 59.** Comparativo del desplazamiento radial en las resinas estudiadas (320°K-301°K)

#### 6.1.4. Mapas de esfuerzo en tubería según condiciones de operación, espesor del defecto y tipo de resina

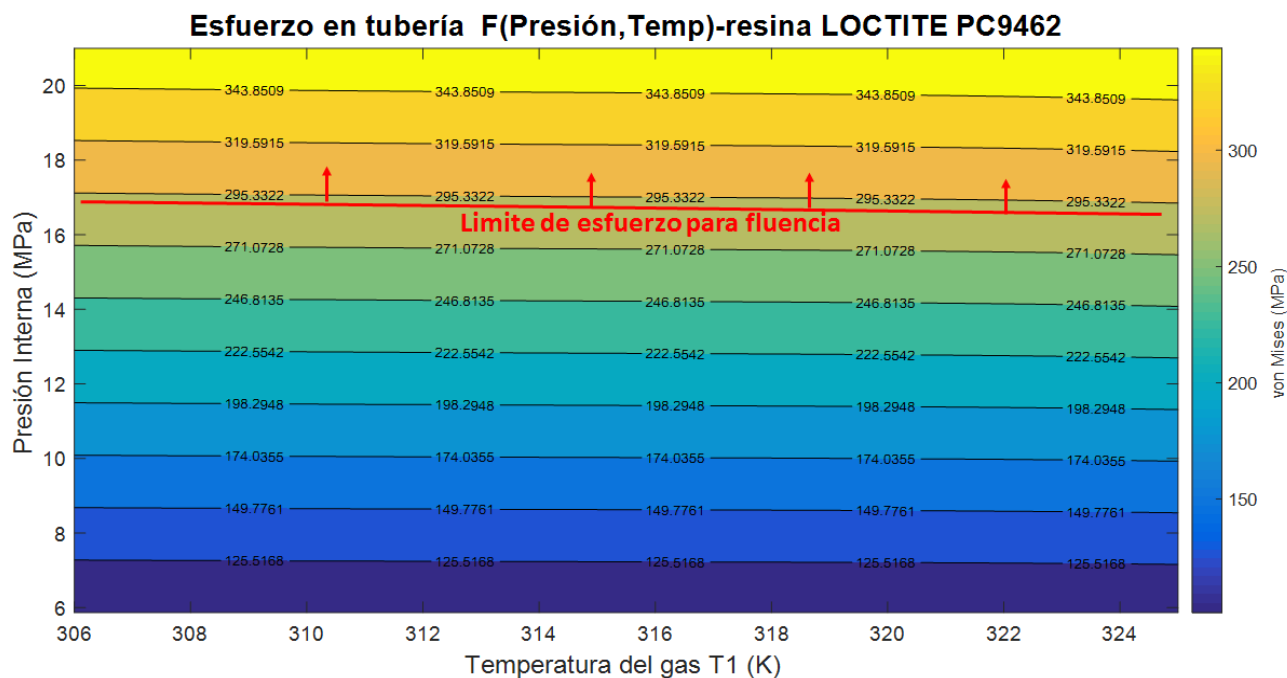
El modelo analítico desarrollado permitió obtener mapas de esfuerzo del tipo Von mises que son muy útiles para la evaluación de condiciones de operación y toma de decisión en lo referente a la viabilidad o no de la reparación.

Los mapas correspondientes a las figuras 60,61 y 62 presentan la relación entre presión interna de tubería, temperatura del gas y esfuerzo equivalente Von- mises. En estos mapas se observa un amplio efecto de la temperatura sobre el incremento de los esfuerzos en el sistema de rehabilitación que utiliza la resina sikadur 32(figura 62) y un efecto mucho menor en los sistemas de rehabilitación que utilizan el otro tipo de resinas.

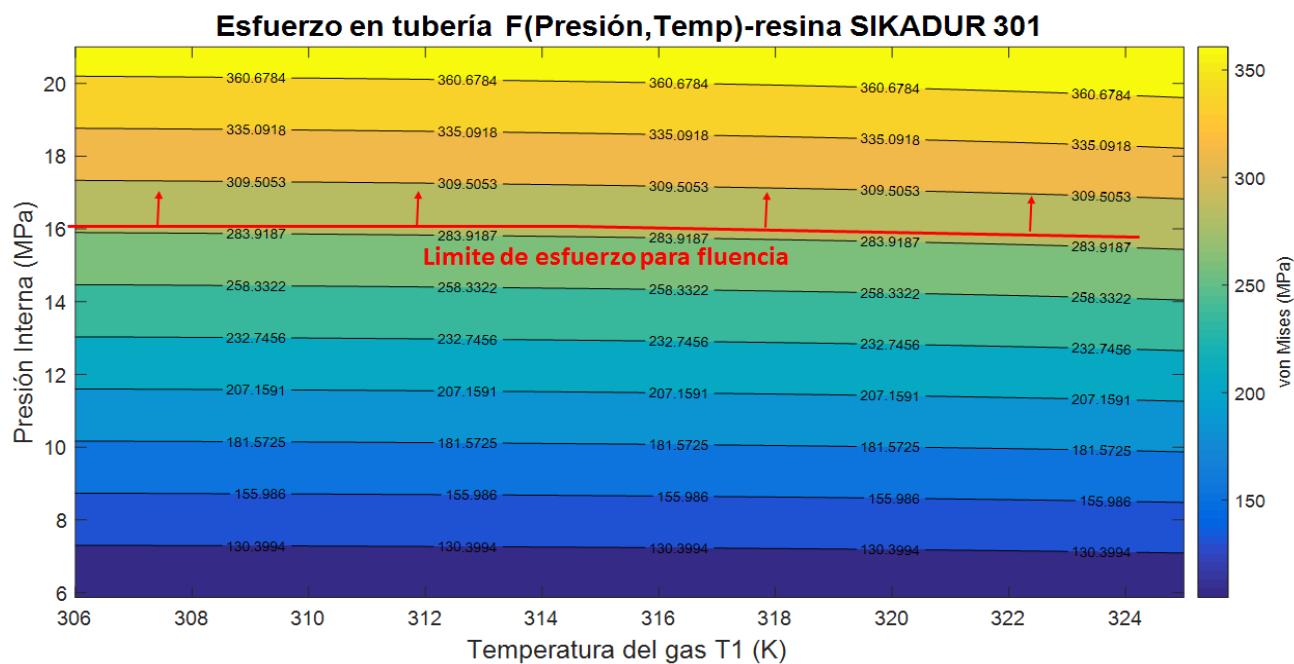
Los mapas desarrollados permiten observar los límites de fluencia y fractura y comparar sus posiciones con las condiciones de operación de la tubería a determinado espesor de la tubería o del defecto.

Los mapas correspondientes a las figuras 63,64 y 65 muestran los esfuerzos equivalentes en la tubería para diferentes espesores de la tubería y temperatura del gas natural. Estos mapas son muy útiles para evaluar si las condiciones de operación ocasionan fluencia o ruptura en la tubería cuando el espesor tiene un tamaño determinado.



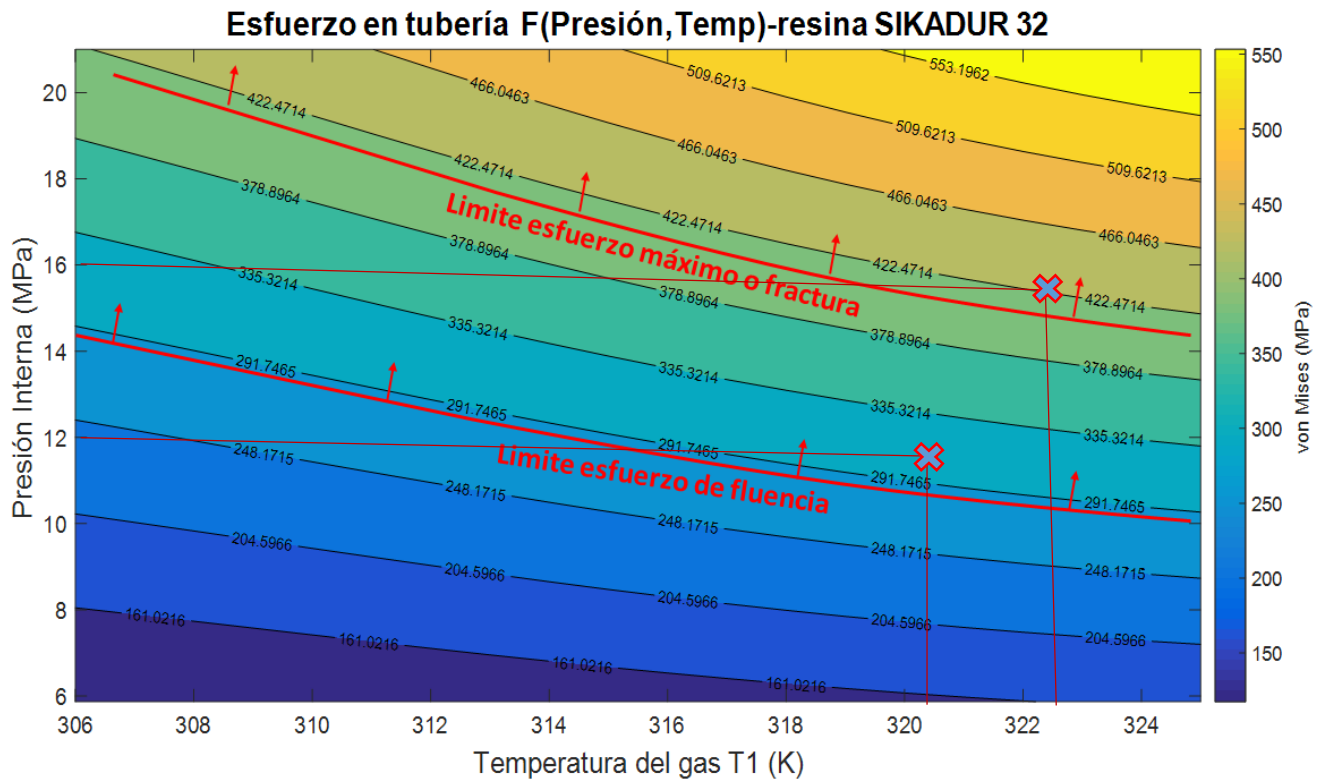


**Figura 60.** Mapa de esfuerzos equivalentes en tubería diámetro 10" según presión interna en tubería y temperatura de gas natural, con refuerzo de resina loctite PC 9462

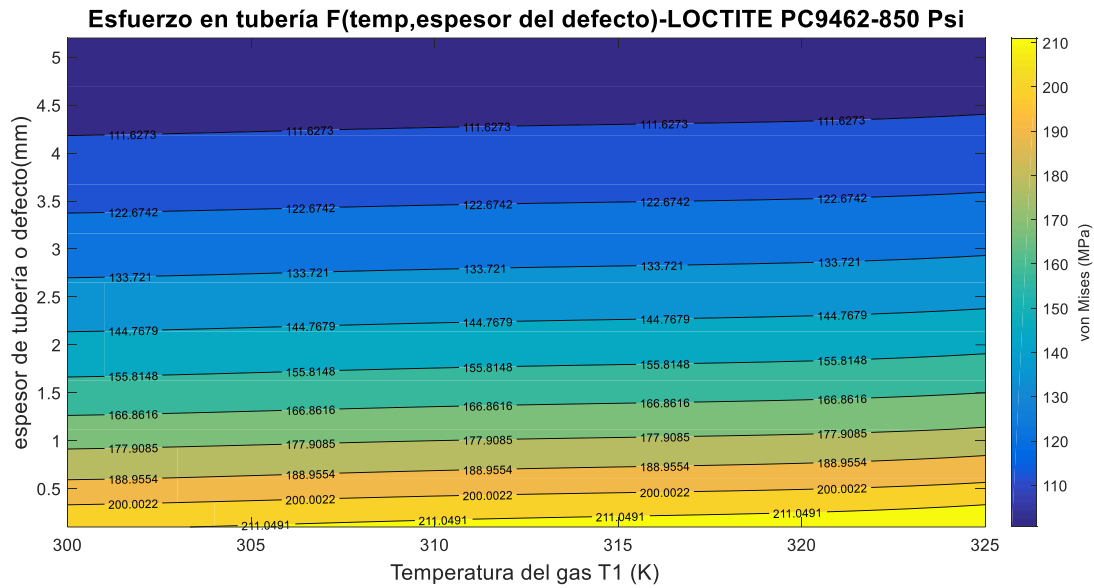


**Figura 61.** Mapa de esfuerzos equivalentes en tubería diámetro 10" según presión interna de tubería y temperatura de gas natural, con refuerzo de resina SIKADUR 301

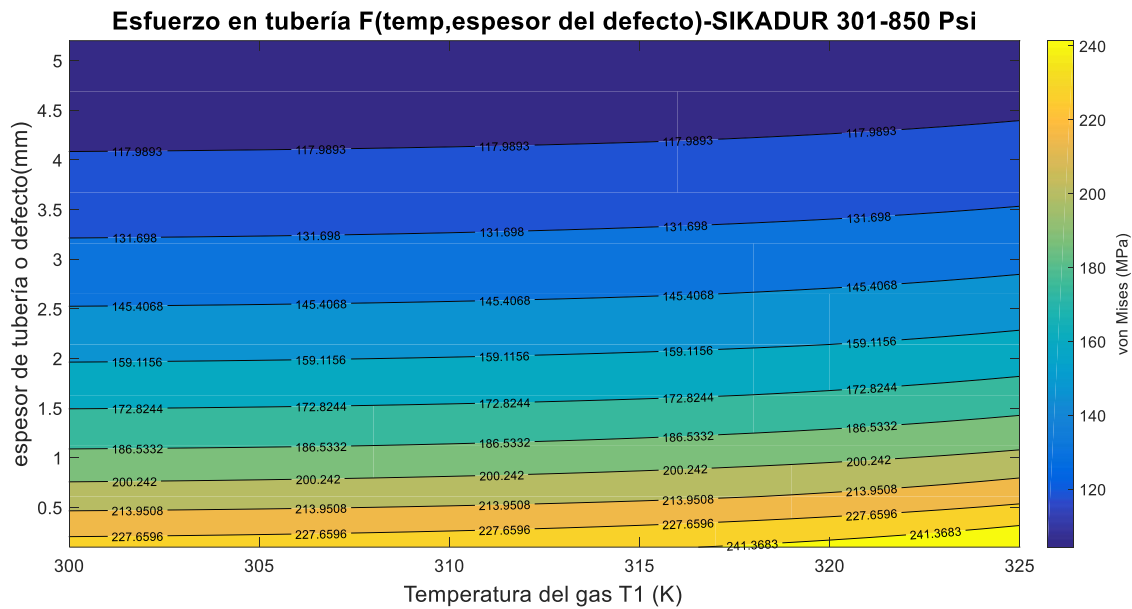
A manera de ejemplo en el siguiente mapa de esfuerzos se observa que a condiciones de operación de 16 Mpa y 323°K (50°C) se encuentra que se supera el límite de fractura, lo cual permite establecer que esta combinación de presión y temperatura en tubería de transporte es inadecuada cuando se utiliza un sistema de refuerzo con resina SIKADUR 32 en tubería de 10". De igual manera el segundo ejemplo permite ver que la combinación de 12 Mpa y 320.5°K (47.5°C) produce fluencia en la tubería



**Figura 62.** Mapa de esfuerzos equivalentes en tubería diámetro 10" según presión interna en tubería y temperatura de gas natural con refuerzo de resina SIKADUR 32

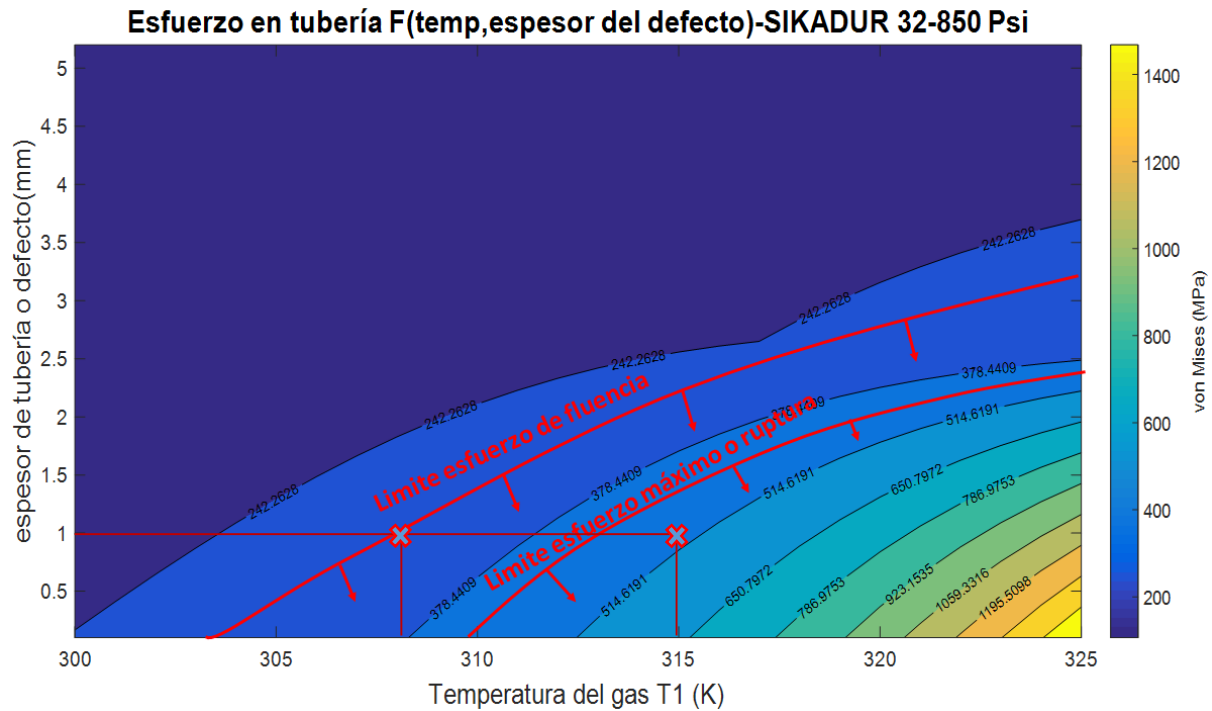


**Figura 63.** Mapa de esfuerzos equivalentes en tubería según espesor de defecto y temperatura de gas natural, con resina Loctite PC 9462



**Figura 64.** Mapa de esfuerzos equivalentes en tubería según espesor de defecto y temperatura de gas natural, con resina Loctite sikadur 301

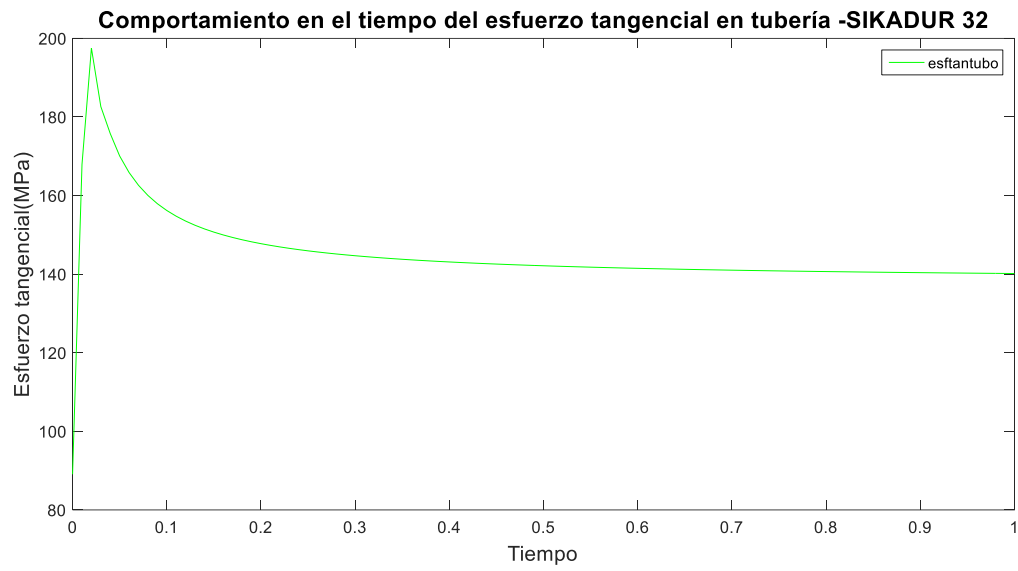
En el siguiente mapa de esfuerzos se observa a manera de ejemplo que para condiciones de operación a 850 PSI cuando la tubería tiene defecto de 1 mm presenta fluencia a 308K (°C) y presenta fractura a 315K(42°C)



**Figura 65.** Mapa de esfuerzos equivalentes en tubería según espesor de defecto y temperatura de gas natural, con resina SIKADUR 32

## 6.2. Resultados análisis modelo analítico para el cálculo de esfuerzos en cilindros multicapa con variación del módulo de Young con la temperatura y consideración viscoelástica con efecto del tiempo

Los resultados del presente modelo solo se presentan en forma de muestra y no se realiza análisis dedicado debido a que en el marco del presente proyecto no se caracterizaron las propiedades viscoelásticas de las resinas epóxicas, por lo tanto los resultados que se presentan no representan el comportamiento real del sistema de rehabilitación sino una aproximación. Sin embargo en la gráfica que se presenta a continuación si se logra apreciar el efecto del tiempo sobre el aumento de los esfuerzos tangenciales en la tubería y la convergencia hacia un valor estable con el tiempo, lo cual es consistente con los modelos de viscoelasticidad lineal. El presente modelo está sujeto entonces a ser complementado con investigaciones que permitan determinar las variaciones de las propiedades viscoelásticas y de esta manera poder en investigaciones futuras predecir el comportamiento mecánico de los sistemas de rehabilitación con el efecto del tiempo y el creep asociado.

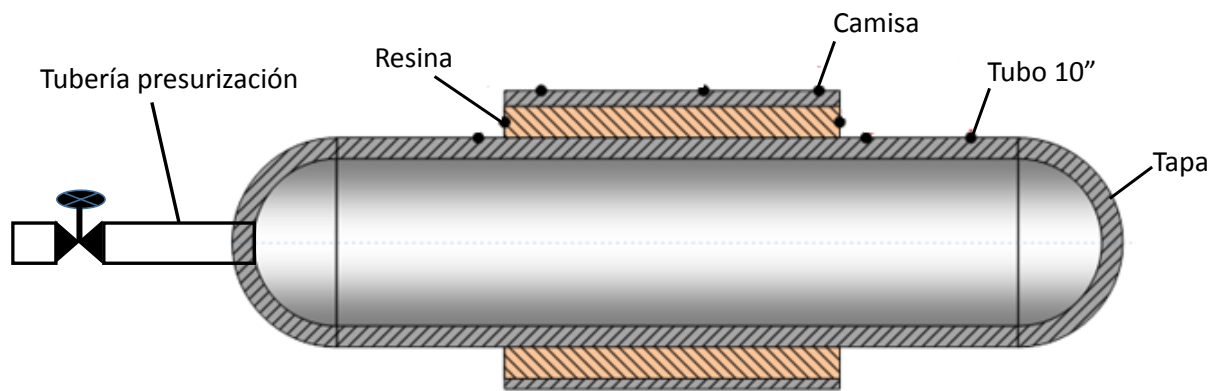


**Figura 66.** Modelo del comportamiento en el tiempo del esfuerzo tangencial en tubería con resina sikadur como refuerzo

## 7. DESARROLLO DE PRUEBAS EXPERIMENTALES EN TUBERÍA

Durante el marco de esta investigación, se desarrollaron pruebas en campo con probetas formadas a partir de tubería de 10 pulgadas según normas ASME[2][56]. Estas pruebas buscan confirmar el efecto de disminución de esfuerzos en la tubería con defecto por acción del sistema de rehabilitación y verificar la precisión de los modelos analíticos propuestos en capítulos anteriores.

En la figura siguiente se aprecia un esquema del tipo de probeta utilizado durante las pruebas.



*Figura 67. Esquema de probetas utilizadas durante el protocolo de pruebas hidrostáticas*

### 7.1. Metodología

La metodología utilizada tiene un enfoque experimental y se desarrolló en las siguientes actividades principales:



*Figura 68. Etapas generales de la metodología de pruebas experimentales en tubería*

### 7.1.1. Protocolo experimental

El primer paso requerido para el desarrollo de las pruebas consistió en elaborar un protocolo experimental donde se establecieron las diferentes acciones, recursos y procedimientos para el desarrollo de las pruebas. El protocolo fue entregado en su momento a promigas, y es la base para la organización de las actividades propias de promigas y los contratistas en relación con el desarrollo de la experimentación.

Las etapas principales del protocolo de prueba se aprecian en la tabla 14.

<b>Etapas</b>	<b>Duración</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Presión</b>
1era etapa	16 días	30°C	850 psi
2da etapa	16 días	40°C	850 psi
3ra etapa	16 días	50°C	850psi
4ta etapa	2 horas	50°C	Incremental hasta ruptura

**Tabla 15.** Etapas principales del protocolo de pruebas hidrostáticas

### 7.1.2. Construcción de banco de pruebas

El banco de pruebas para tubería de 10 pulgadas se construyó en las instalaciones de la estación de bombeo de la arenosa.

Para el desarrollo de las pruebas experimentales en la estación la arenosa, se prepararon 4 probetas de 10" de diámetro nominal. Dos probetas ya contaban con camisa instalada y otras dos fueron preparadas e instaladas en la estación la arenosa.



**Figura 69.** Probetas con refuerzo retiradas de la línea de transporte de ga



La construcción del banco de pruebas requirió de la asistencia de múltiples servicios, entre los que se destacan servicios de soldadura, pruebas hidrostáticas, instalación de resistencias, obras civiles, labores eléctricas, mecánicas y de adquisición de datos entre otras. A continuación se detallan los pasos más importantes en la construcción del banco de pruebas

- **Instalación conexiones y tuberías**

Una vez se contó con las probetas en el sitio de la prueba el siguiente paso consistió en la conexión de las tuberías y accesorios para la presurización.



*Figura 70. Instalación de conexiones y tuberías en probetas*

- **Identificación de los puntos para instalación de las galgas**

De manera alterna se realizó el marcaje de los puntos donde se instalarían las galgas según las indicaciones realizadas en el protocolo.



*Figura 71. Marcaje de puntos para instalación de galgas*



- **Presurización previa a 350 psi**

Una vez instalada la tubería de presurización se procedió a presurizar a 350 psi, con el fin de simular un poco las condiciones de instalación de refuerzos en campo.



*Figura 72. presurización previa a 350 psi a y b*

- **Preparación de la superficie para la instalación de las galgas**

Una vez presurizadas las probetas se procedió con la desconexión del sistema de bombeo y el bloqueo del líquido al interior de las probetas por medio del uso de válvulas de cierre rápido.

El siguiente paso consistió en preparar la superficie de los puntos donde se instalarían galgas que están dentro de la camisa, para lo cual se realizaron varias etapas de desbaste con motortool



*Figura 73. preparación superficial previa a la instalación de las galgas*

- **Monitoreo del espesor de la pared del defecto**

Durante las diferentes etapas de desbaste con motortool y lija se realizó monitoreo con ultrasonido para controlar el espesor del defecto inducido en las probetas



*Figura 74. Monitoreo espesor pared de tubería*

- **Preparación final de la superficie**

Una vez alcanzada la profundidad de defecto deseada se procedió a realizar limpieza final con líquidos especiales para esta labor.



*Figura 75. limpieza previa a la instalación de galgas*

- **Instalación de galgas en zonas de defectos**

El siguiente paso consistió en la instalación de las galgas en los puntos previamente preparados, para lo cual se tuvo especial cuidado en utilizar resinas especiales para la protección de la galga contra el ingreso de agua y un aislante de calor para proteger la galga del calentamiento que producen los procesos de soldado de la camisa



*Figura 76. instalación de galgas en puntos seleccionados*

- **Instalación de las galgas en la zona de la camisa**

una vez finalizada la instalación de las galgas de la tubería, se procedió a realizar el mismo procedimiento con las galgas que van instaladas sobre la camisa, teniendo mucho cuidado con la manipulación de los cables y la posición del mismo respecto a la zona de mayor incidencia de la soldadura.



*Figura 77. instalación de galgas en camisa*



- **Instalación de la camisa**

La instalación de la camisa sobre el tubo es un proceso que lleva varias etapas, entre las que se destaca el montaje con polipasto, el acercamiento de los extremos, la soldadura de las aristas de contacto y el proceso de pulido final de la soldadura. De manera complementaria se utilizaron varillas y elementos separadores para garantizar al máximo que la distancia entre camisa y tubería fuera en lo posible de media pulgada, adicional a lo anterior se instalaron cerámicos de manera provisional entre camisa y tubería para mitigar el calentamiento producto de la soldadura



*Figura 78. Armado de camisas*

- **Llenado con resina epóxica**

Una vez instaladas las camisas y enfriado las probetas se procedió a hacer el llenado de la zona anular entre camisa y tubería con resina SIKADUR 32. Para este fin se utilizó empaque de neopreno para evitar fugas de resina de la zona anular.



*Figura 79.boquillas para llenado con resina*

- **Construcción de encerramiento**

Con el fin de aislar el lugar de pruebas de las labores diarias de la estación, se realizó un encerramiento donde se ubicó la piscina con probetas y todo el equipo de pruebas



*Figura 80.Encerramiento para banco de pruebas*

- **Montaje de probetas en piscina y conexiones**

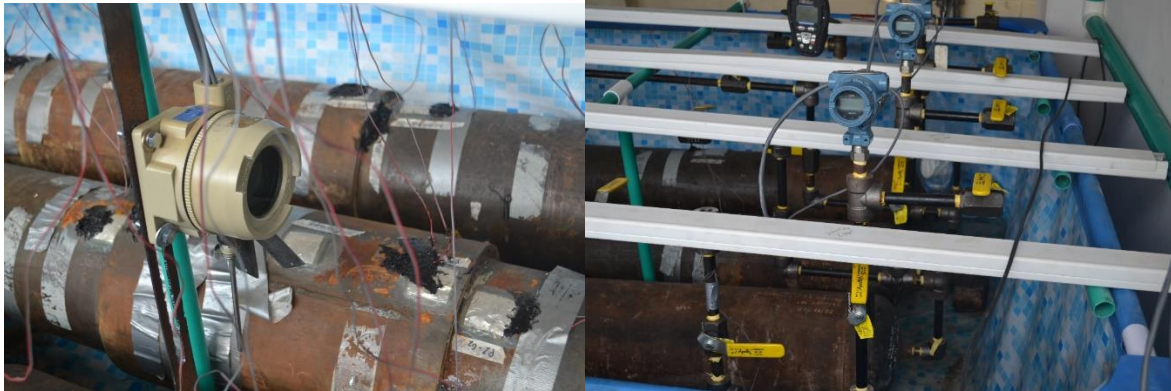
Una vez que las probetas están listas, son instaladas dentro de la piscina donde se colocan sobre polines de madera y se instalan cuñas que eviten su desplazamiento sobre los polines



*Figura 81.montaje de probetas en piscina*

- **Cableado de instrumentación de galgas y sensores de presión y temperatura**

Uno de los pasos más importante es el de la conexión de la instrumentación. Para este fin se instalaron 4 transmisores de presión (1 por probeta), 1 transmisor de temperatura instalado en la zona central de la piscina, adicional a las galgas previamente instaladas.



*Figura 82. instrumentación para medición de presión, temperatura y deformaciones*

- **Evaluación y corrección de fugas**

Una vez se verificaron las conexiones y demás aspectos se procedió con la verificación de estanqueidad y se realizaron las correcciones respectivas en las zonas donde se identificaron fugas.



*Figura 83. corrección de fugas*



### 7.1.3. Inicio de pruebas y monitoreo de variables

Una vez verificada la estanqueidad de las probetas y que todas las conexiones estuviesen correctas, se inició el proceso de adquisición de datos y monitoreo de variables. Para la adquisición de datos se utilizaron 4 tarjetas dedicadas con tecnología Rasp Berry.



*Figura 84. tarjetas de adquisición de datos*

Para el inicio de la prueba se presurizó el sistema a 850 psi con la ayuda de una bomba de desplazamiento positivo y se verificó la correcta generación de las señales hacia el sistema de adquisición de datos.



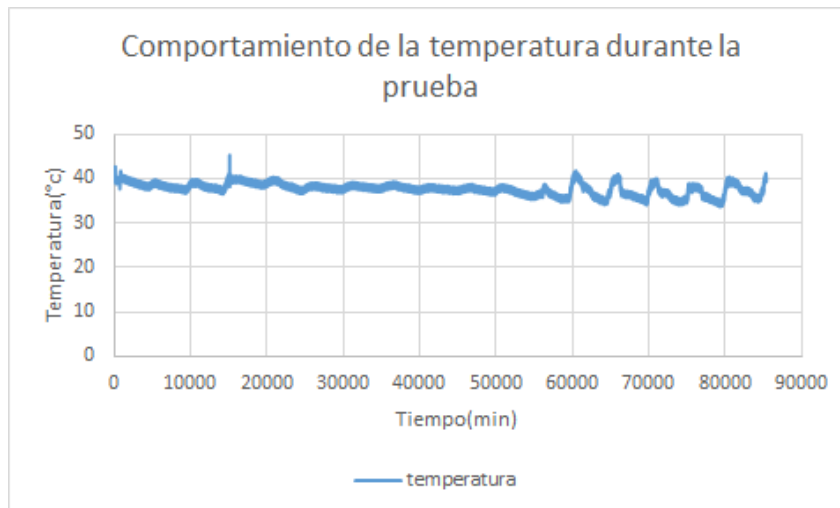
*Figura 85. presurización a 850 psi*

#### 7.1.4. Análisis de resultados

El monitoreo de las variables medidas entregó los datos relacionados con la variación de presión, temperatura y deformaciones en el tiempo.

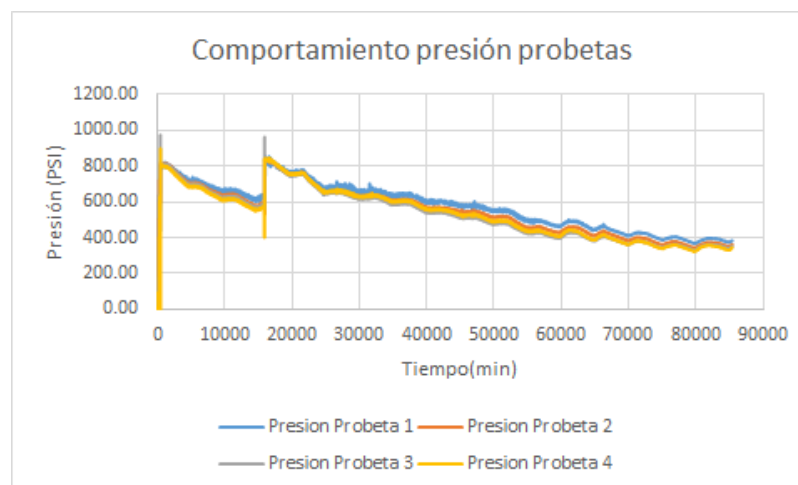
Las deformaciones se convierten en esfuerzos a través de las relaciones constitutivas.

Se aprecia que la temperatura reportada por el transmisor osciló entre 32 y 40°C en el periodo de tiempo evaluado



**Figura 86.** Variación de la temperatura durante la prueba

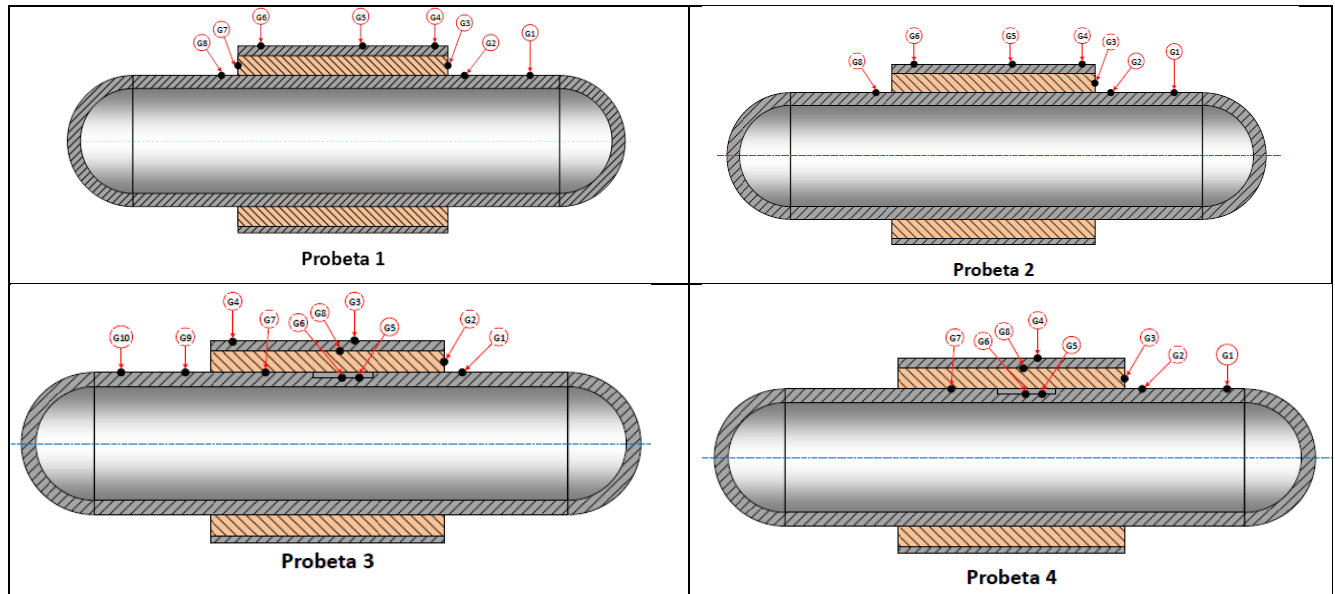
La presión tuvo en general un comportamiento descendente debido a algunas fugas que permanecieron pese a la revisión inicial. El día 3 se realizó una nueva presurización, sin embargo el comportamiento en el tiempo siguió disminuyendo hasta llegar a los valores iniciales de 350 psi.



**Figura 87.** variación de la presión durante la prueba

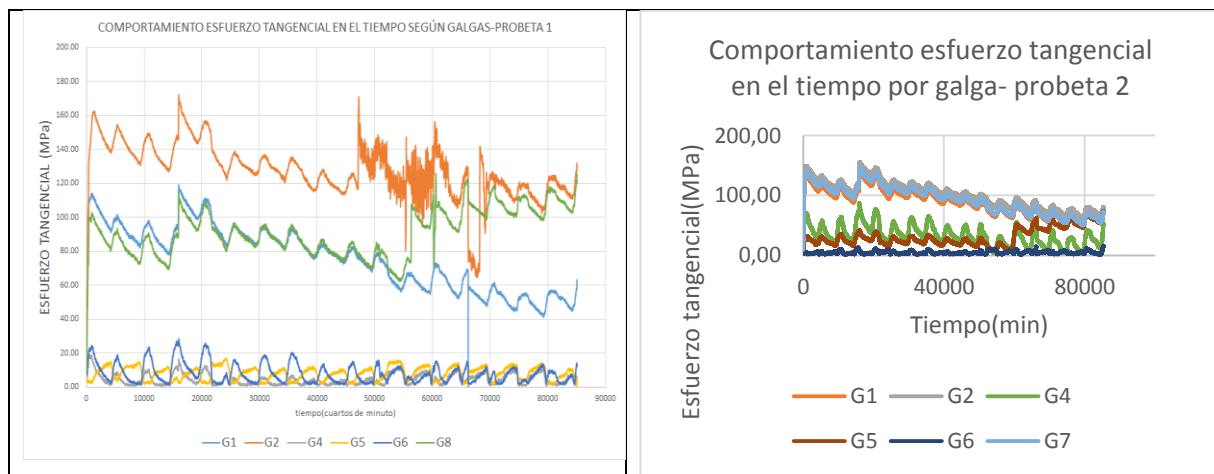


La figura siguiente presenta la distribución de galgas por probeta, encontrándose que solo las probetas 3 y 4 tienen galgas al interior de la camisa, pues son las de nueva fabricación.



**Figura 88.** configuración de galgas por probetas

En la figura siguiente se aprecian los niveles de esfuerzo detectados por galga en las probetas 1 y 2. Se puede observar que algunas señales presentaron comportamientos erráticos posiblemente por contaminación de la señal.



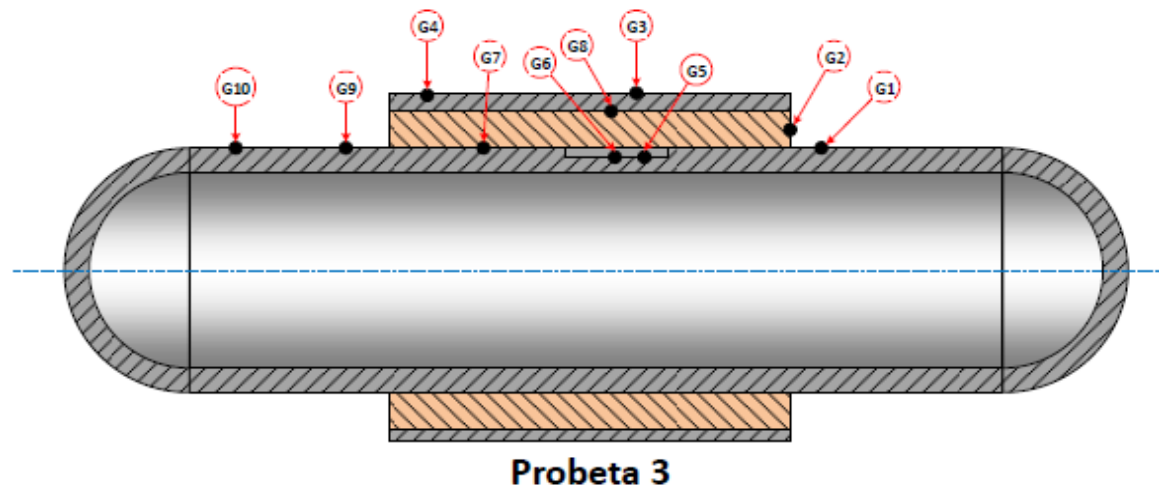
**Figura 89.** Comportamiento esfuerzos en probetas 1 y 2

Las probetas 1, 2 y 4 poseen separadores metálicos entre camisa y tubería pues corresponden a una configuración utilizada actualmente por Promigas. Sin embargo no se profundizará en su análisis por no corresponder al tipo de sistema de rehabilitación estudiado en la investigación presente.

La probeta # 3 no posee taches en su interior, por lo que su análisis si es apropiado para comparar los resultados de la medición con los resultados del modelo analítico. Teniendo en cuenta estos aspectos el análisis realizado sobre la probeta 3 se hará con mayor profundidad.

- **Análisis probeta # 3**

En la figura siguiente se aprecia el esquema de la probeta 3 y las posiciones de las galgas. Es importante aclarar que todas las galgas con excepción de la galga G2 son galgas biaxiales, por lo tanto miden esfuerzos axiales y tangenciales. La galga # 2 está colocada sobre la resina y debido a su posición solo puede medir esfuerzos tangenciales.



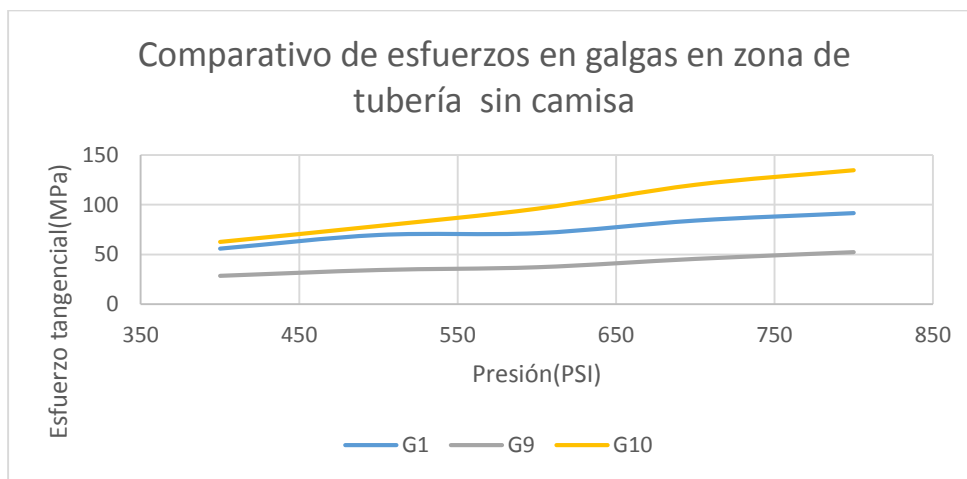
*Figura 90. detalle posición galgas en probeta # 3*

La figura siguiente presenta el detalle del comportamiento de los esfuerzos tangenciales en la probeta # 3. En base a los resultados se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Los datos correspondientes a las señales G3 y G4 no son válidos pues son superiores a todos los demás datos en casi el doble, lo cual va en contra de la lógica de los esfuerzos pues lo normal es que los esfuerzos disminuyan a medida que aumenta el radio cuando la presión exterior es cero.
- Se observa que la señal correspondiente a la galga # 10 es superior en un 15 al 20 % respecto a la señal de la galga # 7. Este resultado muestra que efectivamente la camisa tiene un efecto de reducción de esfuerzos sobre la tubería en la zona donde se instala el refuerzo. El valor de 15 a 20% corresponde bien a lo mostrado en la figura

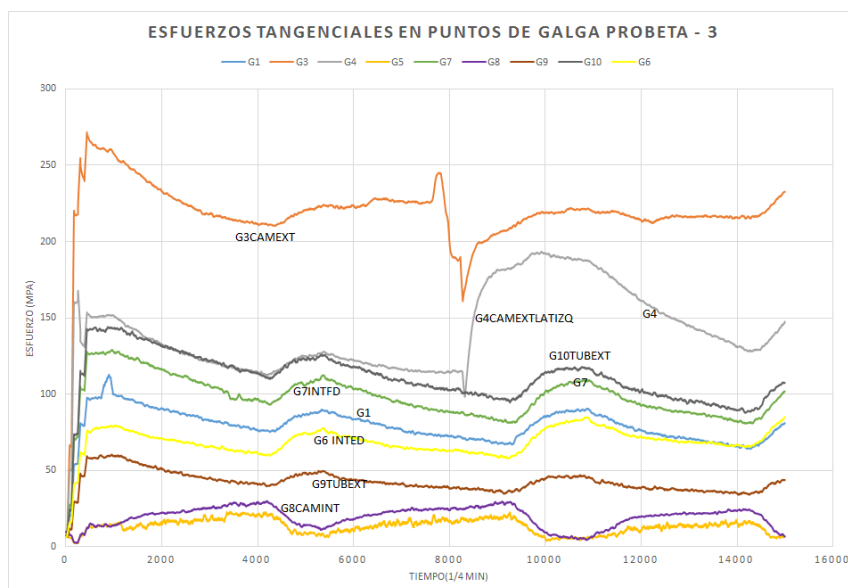
54, donde se aprecia que a temperaturas similares la efectividad del refuerzo cuando se utiliza resina SIKADUR 32 es cercana al 20%.

- Las señales correspondientes a las galgas G1 y G9 se encuentran sobre el tubo en la zona externa al sistema de refuerzo y se diferencian de la galga G10, en que la galga G10 se encuentra bastante retirada de la camisa.
- Al comparar las señales G1, G9 y G10 en la figura 91 se aprecia que los esfuerzos en los puntos G1 y G9 son inferiores a los del punto G10 para todo el rango de presión evaluado. Se observa que al aumentar la presión se conservan mayores valores de esfuerzo en la galga G10 que en la G1 o G9, lo cual evidencia que el sistema de refuerzo si ejerce una disminución de esfuerzos sobre la tubería. Esto se explica desde el hecho de que la tubería tiene menos posibilidades de expandirse en la zona cercana a la camisa por acción de la restricción de la camisa. Al haber menor expansión la galga registrará menores niveles de deformación y por lo tanto de esfuerzo.



**Figura 91.** Comparación de esfuerzos en galgas 1,9 y 10

- La galga G6 se encuentran sobre un defecto en una zona en que los esfuerzos deberían ser superiores a los de otros puntos de la tubería donde no hay defecto. Sin embargo la gráfica muestra menores valores a los que registran galgas como la G7 por ejemplo. Esta disminución de esfuerzos se da gracias a la acción del sistema de rehabilitación.



**Figura 92.**Comportamiento esfuerzos en probeta 3

## 7.2. Verificación del modelo analítico

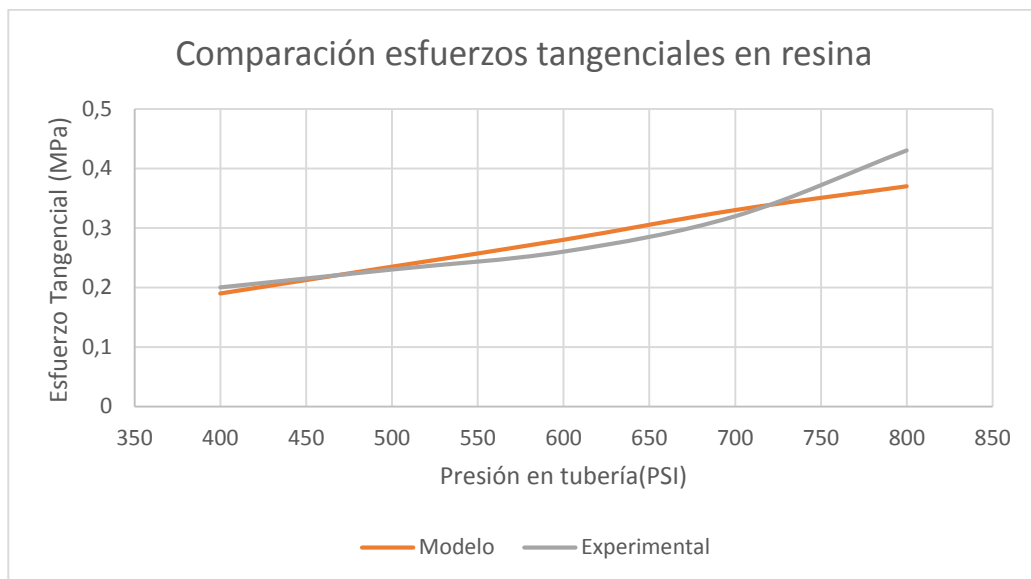
El modelo analítico desarrollado en la presente investigación fue verificado a través de la experimentación con la probeta # 3 y a través de elementos finitos. En ambos casos se observa una buena aproximación del modelo analítico respecto a los datos experimentales y de elementos finitos lo cual se convierte este modelo en una herramienta práctica para realizar inferencias y cálculos preliminares confiables en sistemas de refuerzo o rehabilitación de tubería con cilindros multicapas en especial cuando una o más de las capas posee algún material con variación del módulo de Young con la temperatura o radio.

### 7.2.1. Verificación con datos experimentales

La verificación de la validez del modelo analítico se realizó al comparar los resultados experimentales de esfuerzos tangenciales en 3 puntos de la tubería con los resultados que entregaría el modelo analítico en los mismos puntos.

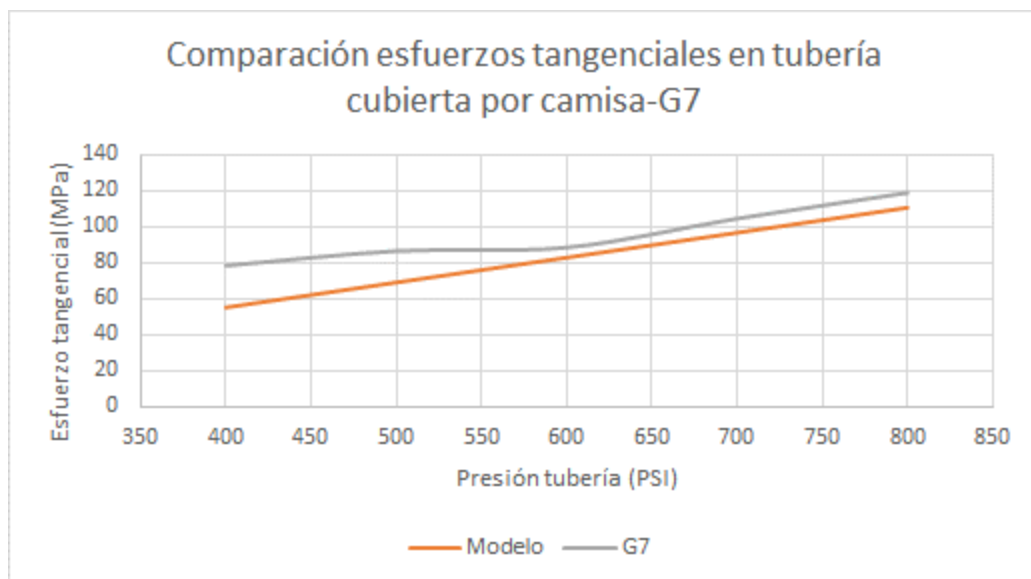
La figura siguiente muestra los resultados de la comparación de los esfuerzos tangenciales en la resina correspondientes al punto G2 entre el modelo y los resultados experimentales.

La tendencia mostrada por el modelo analítico se ajusta bastante bien a la tendencia de los resultados experimentales con una ligera desviación de 0.07 MPa a los 800 PSI



**Figura 93.**Comportamiento esfuerzos en probetas 1 y 2

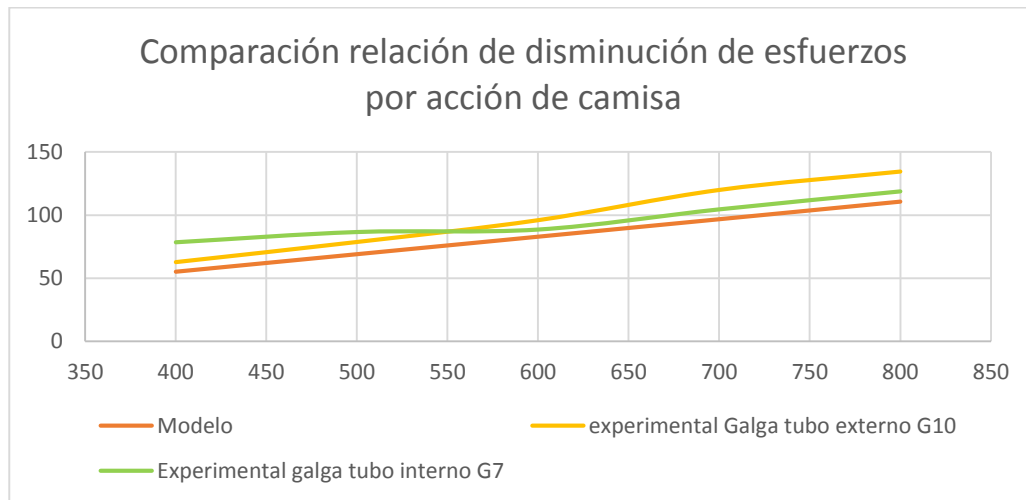
Al comparar los resultados del modelo analítico con los experimentales en el punto G7 se observa que hay una importante convergencia en ambos resultados en especial en presiones superiores a los 550 PSI. Es importante destacar que la galga G7 está cubierta por la camisa, por lo tanto su comportamiento representa el comportamiento del esfuerzo tangencial a diferentes presiones de operación.



**Figura 94.**Comportamiento esfuerzos en probetas 1 y 2

La siguiente gráfica permite ver la acción de la disminución de esfuerzos por acción de la camisa. Se aprecia que la reducción de esfuerzos es de un 20% respecto al punto G10 . Por

otro lado se observa que el modelo reporta una reducción del 25%, lo cual refleja una buena aproximación del modelo con respecto a los datos reales,



**Figura 95.** Comportamiento esfuerzos en probetas 1 y 2

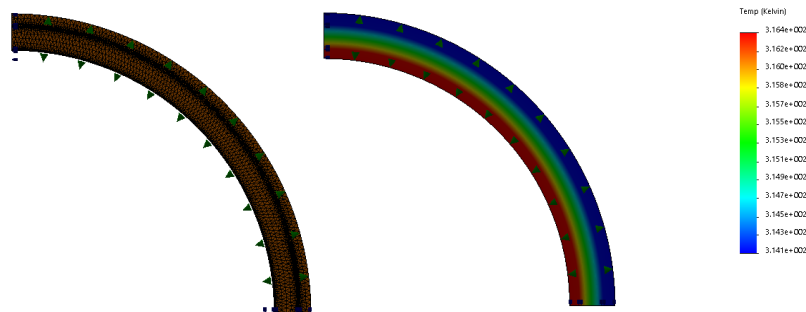
### 7.2.2. Verificación por elementos finitos

Para el análisis por elementos finitos se utilizó el software ABAQUS donde se modeló un sistema cilíndrico compuesto por 3 capas: tubería, resina y camisa con las mismas dimensiones utilizadas en el modelo, las cuales son las mismas a las utilizadas en los sistemas de rehabilitación reales usados en la experimentación.

Se realizaron simulaciones a varias condiciones de presión y temperatura y se midió el esfuerzo von mises y el desplazamiento radial en cada condición. Las condiciones evaluadas se resumen en la siguiente tabla:

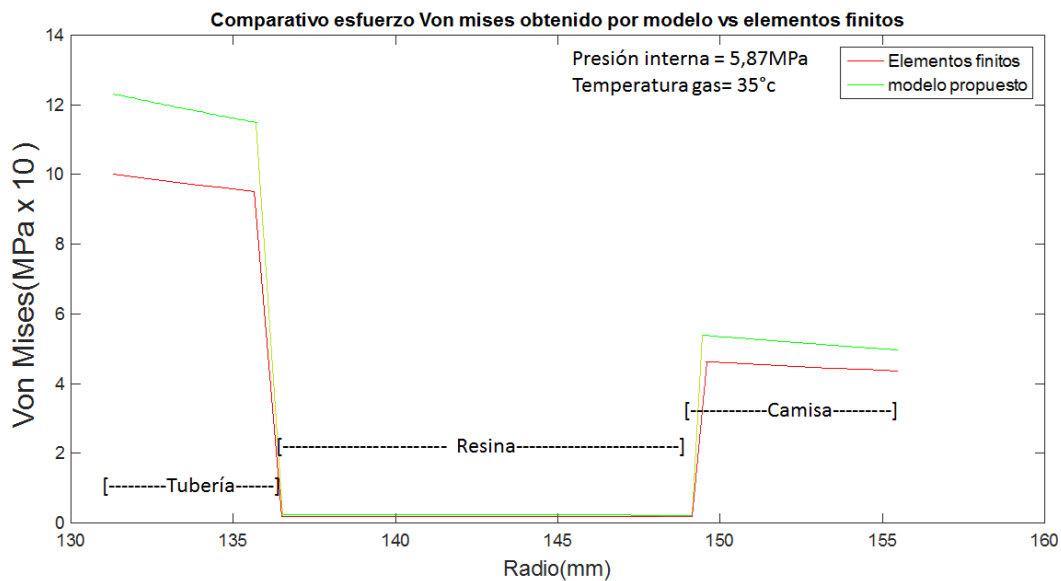
Prueba	Temperatura gas	Presión gas	Resultados
1	35°C	5.87MPa	Esfuerzo vonmises y desplazamiento radial
2	50°C	5.87 MPa	Esfuerzo vonmises y desplazamiento radial
3	50°C	7 MPa	Esfuerzo vonmises y desplazamiento radial

**Tabla 16.** Condiciones presión temperatura para comparación entre modelo por elementos finitos y modelo analítico

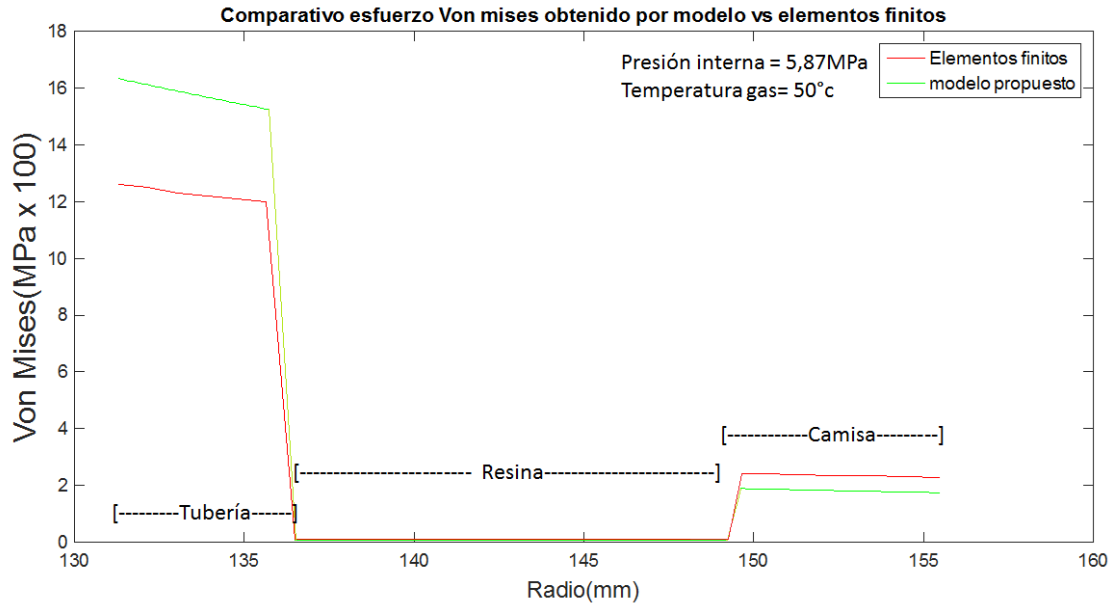


**Figura 96.** Cilindro multicapa modelado por elementos finitos

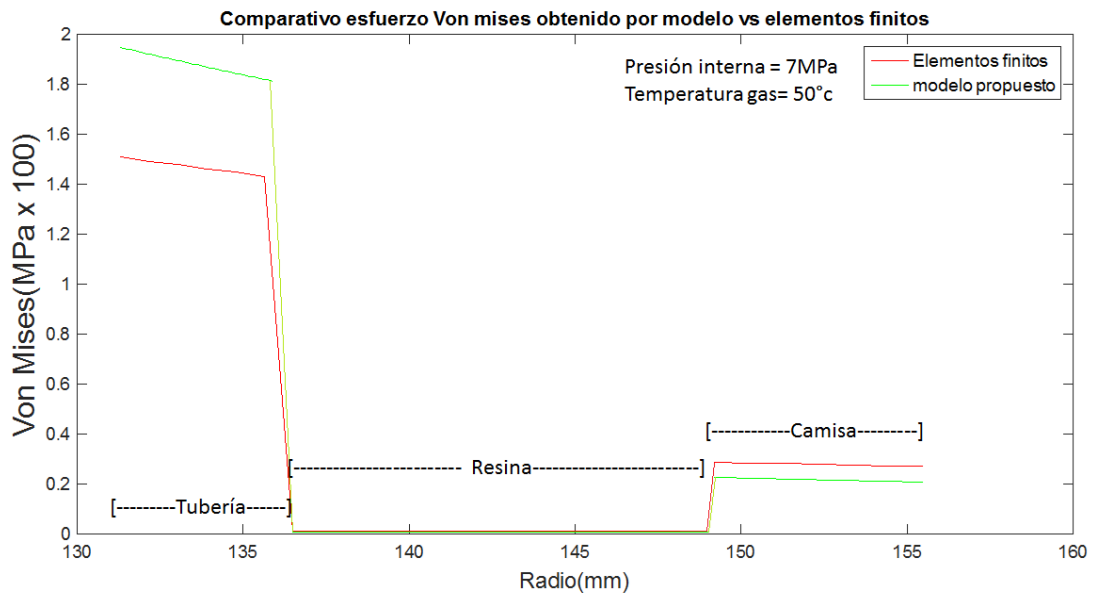
Los resultados de la comparación realizada según las condiciones de la tabla 14, arrojó los resultados que se aprecian en las figuras 97 a 99. En las 3 combinaciones de presión y temperatura se observa que la convergencia entre ambos modelos es bastante buena, las desviaciones en el mayor de los casos no superan los 20 MPa equivalentes a una desviación cercana al 15 % en el radio interno de la tubería e inferior al 5% en la camisa.



**Figura 97.**comparativo esfuerzos von mises en cilindro multicapa elementos finitos vs modelo ( $P_0 = 5.87 \text{ Mpa}$  @  $35^\circ\text{C}$ )



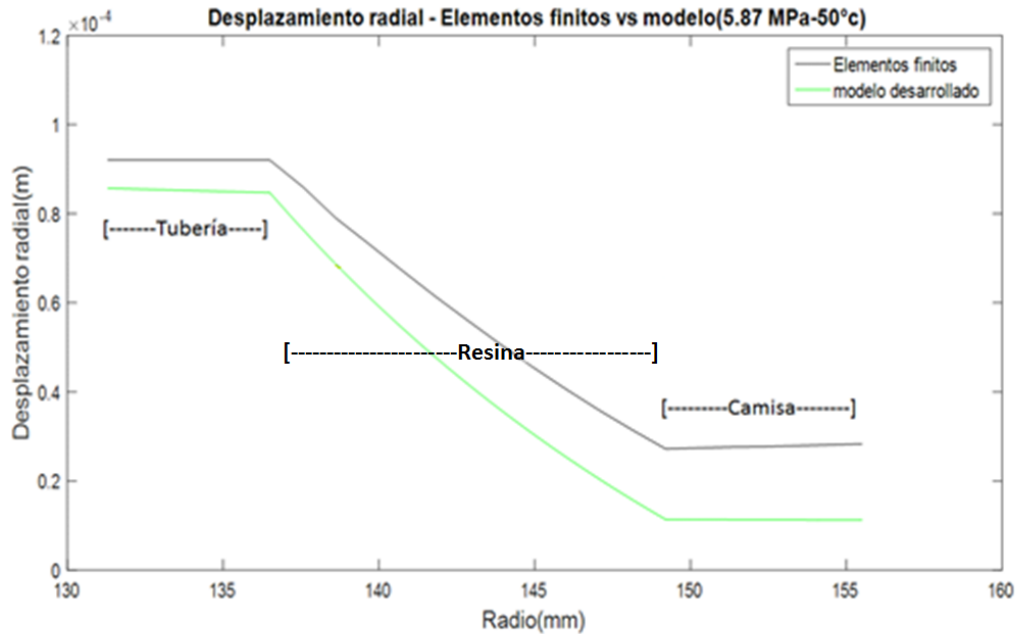
**Figura 98.**comparativo esfuerzos von mises en cilindro multicapa elementos finitos vs modelo ( $P_0 = 5.87 \text{ Mpa}$  @50°C)



**Figura 99.**comparativo esfuerzos von mises en cilindro multicapa elementos finitos vs modelo ( $P_0 = 7 \text{ Mpa}$  @50°C)

La figura 100 presenta la comparación del desplazamiento radial a lo largo del sistema de rehabilitación calculado a partir de elementos finitos y el modelo, encontrándose desviaciones que no superan las 10 micras.





**Figura 100.**comparativo desplazamiento radial en cilindro multicapa –elementos finitos vs modelo ( $P_0 = 7 \text{ MPa}$  @  $50^\circ\text{C}$ )

## 8. CONCLUSIONES

El análisis de la información obtenida en cada una de las etapas de esta investigación permiten concluir que:

- La efectividad del sistema de rehabilitación estudiado es afectada significativamente por los cambios de temperatura cuando se utiliza la resina SIKADUR 32 como elemento de refuerzo, esto debido a la alta disminución de rigidez que ésta sufre ante pequeños cambios de temperatura
- El modelo analítico desarrollado permite la obtención de mapas de esfuerzo para diferentes condiciones de presión y temperatura del gas transportado y para cualquier tamaño del espesor del defecto. Los mapas permiten establecer las combinaciones entre temperatura, presión y espesor en las que se alcanzan los niveles de fluencia y/o ruptura en la tubería de gas natural.
- Dentro del marco de la investigación se desarrolló un algoritmo que permite resolver las ecuaciones diferenciales propuestas en los modelos presentados. El algoritmo permite recibir como dato de entrada nuevas configuraciones de materiales, propiedades mecánicas, constantes térmicas, dimensiones geométricas entre otras y obtener nuevos mapas de esfuerzo así como curvas comparativas y análisis de tendencias o efectos.
- Dentro de las resinas estudiadas, la más recomendable para la aplicación estudiada es la resina loctite PC9462. La resina loctite PC9462 debe su rigidez principalmente a su

alto contenido de piedra caliza ( $\text{CaCO}_3$ ) como relleno, la piedra caliza es uno de los rellenos más efectivos para aumentar rigidez, gracias a su alto calor específico. La adición de nano- $\text{CaCO}_3$  a la matriz epoxi aumenta el área de contacto superficial entre las partículas de nano- $\text{CaCO}_3$  y la matriz de epoxi, que a su vez impide la difusión del calor durante la reacción de los nanocompuestos TGPAP /  $\text{CaCO}_3$ .

- El modelo de cálculo de esfuerzos y desplazamientos desarrollado en la presente investigación demostró ser confiable para realizar cálculos preliminares en sistemas de rehabilitación de tubería y/o refuerzo
- El modelo analítico permite definir que la resina SIKADUR 32 tiene poca capacidad de transmitir los esfuerzos de la tubería hacia la camisa cuando hay aumentos de temperatura y la comparación con las demás resinas permite observar que la energía de deformación que no se transmite hacia la camisa es absorbida por la tubería, y que ante valores iguales de presión y temperatura la tasa de transmisión de energía de deformación resulta constante al compararse con otro tipo de resina
- Los resultados entregados por el modelo analítico permiten establecer que ante ciertas combinaciones de presión y temperatura es posible que la capa de resina se vea expuesta a esfuerzos tangenciales positivos y negativos a lo largo del radio. La combinación de esfuerzos negativos y positivos en un mismo cilindro puede producir el fenómeno de delaminación. Este tipo de comportamientos no es posible predecirlos utilizando modelos clásicos de elasticidad.
- Los análisis realizados demuestran que la pérdida de rigidez de la resina epóxica no generan daños por esfuerzos de tensión en la resina, pues los niveles máximos de esfuerzo a que se ve sometida la resina no superan los límites de fluencia, sin embargo si pueden existir riesgos de delaminación como se mencionó en el ítem anterior.
- Las desviaciones presentes en el modelamiento por elementos finitos y el modelo analítico propuesto se deben principalmente a la discretización de la malla y a la no existencia de esfuerzos longitudinales en el modelo realizado por elementos finitos por tratarse de manera axisimétrica y en deformación plana.
- Las pruebas experimentales permiten establecer una clara importancia del sistema de rehabilitación, al confirmarse que los esfuerzos en la zona interna de la tubería son consistentemente menores a los esfuerzos en las zonas de la tubería sin camisa.
- La temperatura en las probetas no es completamente uniforme, lo que conlleva a su vez a que se presenten ciertas imprecisiones en el cálculo de los esfuerzos del sistema de rehabilitación, dada la alta importancia de la temperatura sobre la rigidez de las resinas-

## **9. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS POSTERIORES**

- Es importante desarrollar investigaciones complementarias a la presente investigación para el cálculo de la constante de viscosidad de resinas epóxicas, y de esta manera alimentar información al modelo propuesto para el cálculo del creep
- Con la finalidad de obtener modelos más precisos para el cálculo de esfuerzos en sistemas de rehabilitación, se recomienda caracterizar las resinas epóxicas en lo relacionado a la influencia de la temperatura sobre la constante de poisson, la constante de expansión térmica y el módulo de elasticidad a compresión, y de esta manera obtener modelos más rigurosos y efectivos.
- Se recomienda experimentar con nuevos tipos de resina y en especial nuevos tipos de relleno, con el fin de buscar combinaciones que brinden propiedades mecánicas más estables ante los cambios de temperatura y con mayor rigidez
- Teniendo en cuenta que los sistemas de refuerzo disminuyen el estado de esfuerzos en la zona de la tubería donde a partir de la presión en que se instalan se recomienda hacer pruebas con sistemas de rehabilitación en tubería no presurizada.

## 10. REFERENCIAS

- [1] C. Manfredi and J. L. Otegui, "Failures by SCC in buried pipelines," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 9, no. 5, pp. 495–509, Oct. 2002.
- [2] Asme, *Repair of Pressure Equipment and Piping PCC-2*. 2006, pp. 75–127.
- [3] H. Maury *et al.*, "Critical and comprehensive evaluation of high pressure pipeline Rehabilitation Methods and patents for seeking innovation trends," *Recent patterns Eng.*, vol. II, no. 3, pp. 1–10, 2017.
- [4] F. Mechanics, "Fundamentals of Fracture Mechanics 11.1," no. 1921, p. 446, 1950.
- [5] S. Yamini and R. J. Young, "The mechanical properties of epoxy resins," *J. Mater. Sci.*, vol. 15, no. 7, pp. 1814–1822, Jul. 1980.
- [6] J. Chiguma, E. Johnson, P. Shah, N. Gornopolskaya, and W. E. Jones Jr., "Thermal Diffusivity and Thermal Conductivity of Epoxy-Based Nanocomposites by the Laser Flash and Differential Scanning Calorimetry Techniques," *Open J. Compos. Mater.*, vol. 3, no. 3, pp. 51–62, Jul. 2013.
- [7] F. A. Rumiche P J Ernesto Indacochea B, "Estudios de Caso de Fallas y Accidentes en Gasoductos y Oleoductos."
- [8] Bureau of Transportation Statistics, "Table 2-3: Transportation Accidents by Mode | Bureau of Transportation Statistics." [Online]. Available: [https://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov.bts/files/publications/national\\_transportation\\_statistics/html/table\\_02\\_03.html](https://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov.bts/files/publications/national_transportation_statistics/html/table_02_03.html). [Accessed: 24-Sep-2017].
- [9] G. A. Papadakis, "Major hazard pipelines: A comparative study of onshore transmission accidents," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 12, no. 1, pp. 91–107, Jan. 1999.
- [10] K. Farrag, "Selection of Pipe Repair Methods," 2013.
- [11] C. Alexander and A. Beckett, "An Experimental Study to Evaluate the Performance of Competing Filler Materials Used With Type B and Stand-Off Steel Sleeves," in *Volume 3: Operations, Monitoring and Maintenance; Materials and Joining*, 2016, p. V003T04A026.
- [12] N. Srinivasulu and V. Tejaswi, "MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS," *Int. J. Res. Eng. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 78–81, 2012.
- [13] J. F. (John F. Knott, *Fundamentals of fracture mechanics*. Butterworth, 1973.
- [14] D. Chakrabarty, B. Das, and S. Roy, "Epoxy resin-poly(ethyl methacrylate) interpenetrating polymer networks: Morphology, mechanical, and thermal properties," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 67, no. 6, pp. 1051–1059, Feb. 1998.
- [15] A. Apicella, L. Nicolais, G. Astarita, and E. Drioli, "Effect of thermal history on water sorption, elastic properties and the glass transition of epoxy resins,"

- Polymer (Guildf).*, vol. 20, no. 9, pp. 1143–1148, Sep. 1979.
- [16] H. Kimura, A. Matsumoto, K. Hasegawa, K. Ohtsuka, and A. Fukuda, "Epoxy resin cured by bisphenol A based benzoxazine," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 68, no. 12, pp. 1903–1910, Jun. 1998.
  - [17] V. B. Gupta, L. T. Drzal, C. Y.-C. Lee, and M. J. Rich, "The temperature-dependence of some mechanical properties of a cured epoxy resin system," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 25, no. 13, pp. 812–823, Sep. 1985.
  - [18] K. P. Unnikrishnan and T. Dr. Eby Thomas, "Studies on the Toughening of Epoxy Resins," 2006.
  - [19] J. Richeton, S. Ahzi, K. S. Vecchio, F. C. Jiang, and R. R. Adharapurapu, "Influence of temperature and strain rate on the mechanical behavior of three amorphous polymers: Characterization and modeling of the compressive yield stress," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 43, no. 7–8, pp. 2318–2335, Apr. 2006.
  - [20] A. Gopinath, M. Senthil Kumar, and A. Elayaperumal, "Experimental investigations on mechanical properties of jute fiber reinforced composites with polyester and epoxy resin matrices," in *Procedia Engineering*, 2014, vol. 97, pp. 2052–2063.
  - [21] M. Palumbo, G. Donzella, E. Tempesti, and P. Ferruti, "On the compressive elasticity of epoxy resins filled with hollow glass microspheres," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 60, no. 1, pp. 47–53, Apr. 1996.
  - [22] M. Hussain, Y. Oku, A. Nakahira, and K. Niihara, "Effects of wet ball-milling on particle dispersion and mechanical properties of particulate epoxy composites," *Mater. Lett.*, vol. 26, no. 3, pp. 177–184, Feb. 1996.
  - [23] E. B. Trostyanskaya, A. M. Poimanov, E. F. Nosov, and A. R. Bel'nik, "Effect of fillers on the structure and properties of cured resins," *Polym. Mech.*, vol. 5, no. 6, pp. 905–909, 1972.
  - [24] F.-L. Jin and S.-J. Park, "Thermal Stability of Trifunctional Epoxy Resins Modified with Nanosized Calcium Carbonate," *Bull. Korean Chem. Soc.*, vol. 30, no. 2, pp. 334–338, Feb. 2009.
  - [25] S. Ahmed and F. R. Jones, "The effect of particulate agglomeration and the residual stress state on the modulus of filled resin Part 1. Modulus of untreated graded sand-filled composite," *Composites*, vol. 19, no. 4, pp. 277–282, Jul. 1988.
  - [26] J. Abenojar, J. Tutor, Y. Ballesteros, J. C. del Real, and M. A. Martínez, "Erosion-wear, mechanical and thermal properties of silica filled epoxy nanocomposites," *Compos. Part B Eng.*, vol. 120, pp. 42–53, Jul. 2017.
  - [27] D. J. Bray *et al.*, "The modelling of the toughening of epoxy polymers via silica nanoparticles: The effects of volume fraction and particle size," *Polym.*

- (United Kingdom), vol. 54, no. 26, pp. 7022–7032, Dec. 2013.
- [28] A. N. Ibtihal, A. A. Ibrahim, and F. M. Hassan, "Study the mechanical properties of epoxy resin reinforced with silica (quartz) and alumina particles," *Iraqi J. Mech. Mater. Eng.*, vol. 11, no. 3, pp. 486–506, 2011.
  - [29] W. Jiang, F. L. Jin, and S. J. Park, "Thermo-mechanical behaviors of epoxy resins reinforced with nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles," *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 18, no. 2, pp. 594–596, Mar. 2012.
  - [30] S. Halder, T. Prasad, N. I. Khan, M. S. Goyat, and S. Ram Chauhan, "Superior mechanical properties of poly vinyl alcohol-assisted ZnO nanoparticle reinforced epoxy composites," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 192, pp. 198–209, May 2017.
  - [31] E. J. Hearn, *Mechanics of Materials 2: The mechanics of elastic and plastic deformation of solids and structural materials*. Butterworth-Heinemann, 1997.
  - [32] G. Lamé, *Mémoire sur l'équilibre intérieur des corps solides homogènes*. 1833.
  - [33] K. Bahoum, M. Diany, and M. Mabrouki, "Stress analysis of compound cylinders subjected to thermo-mechanical loads," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 31, no. 4, pp. 1805–1811, Apr. 2017.
  - [34] W. R. D. Wilson and W. J. Skelton, "Paper 5: Design of High Pressure Cylinders," in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings*, 1967, vol. 182, no. 3, pp. 1–10.
  - [35] Q. Zhang, Z. W. Wang, C. Y. Tang, D. P. Hu, P. Q. Liu, and L. Z. Xia, "Analytical solution of the thermo-mechanical stresses in a multilayered composite pressure vessel considering the influence of the closed ends," *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 98, pp. 102–110, Oct. 2012.
  - [36] M. R. (Mohamad R. Eslami, *Theory of elasticity and thermal stresses : explanations, problems and solutions*. Springer, 2013.
  - [37] J. Margetson and P. Stanley, "Stress and failure probability analysis for a transversely isotropic, brittle, elastic cylinder subjected to internal pressure and axisymmetric thermal loading," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 18, no. 11–12, pp. 561–570, Nov. 1976.
  - [38] H. A. Sollund, K. Vedeld, and J. Hellesland, "Efficient analytical solutions for heated and pressurized multi-layer cylinders," *Ocean Eng.*, vol. 92, pp. 285–295, Dec. 2014.
  - [39] K. Vedeld and H. A. Sollund, "Stresses in heated pressurized multi-layer cylinders in generalized plane strain conditions," *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 120–121, no. 1, pp. 27–35, Aug. 2014.
  - [40] K. Bahoum, M. Diany, and M. Mabrouki, "Stress analysis of compound cylinders subjected to thermo-mechanical loads," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 31, no. 4, pp. 1805–1811, Apr. 2017.

- [41] A. M. R. M. Algbory, *Al-Qadisiya Journal for Engineering Sciences*, vol. 4, no. 2. Al-Qadisiyah University, 2017.
- [42] G. H. Majzoobi, G. H. Farrahi, M. K. Pipelzadeh, and A. Akbari, "Experimental and finite element prediction of bursting pressure in compound cylinders," *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 81, no. 12, pp. 889–896, Dec. 2004.
- [43] C. O. Horgan and A. M. Chan, "The Stress Response of Functionally Graded Isotropic Linearly Elastic Rotating Disks," *J. Elast.*, vol. 55, no. 3, pp. 219–230, 1999.
- [44] M. Jabbari, S. Sohrabpour, and M. R. Eslami, "Mechanical and thermal stresses in a functionally graded hollow cylinder due to radially symmetric loads," *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 79, no. 7, pp. 493–497, Jul. 2002.
- [45] M. P. L. Robert W. Zimmerman, Melanie P. Lut, "THERMAL STRESSES AND THERMAL EXPANSION IN A UNIFORMLY HEATED FUNCTIONALLY GRADED CYLINDER," *J. Therm. Stress.*, vol. 22, no. 2, pp. 177–188, Mar. 1999.
- [46] Z. Shi, T. Zhang, and H. Xiang, "Exact solutions of heterogeneous elastic hollow cylinders," *Compos. Struct.*, vol. 79, no. 1, pp. 140–147, Jun. 2007.
- [47] G. Kansal and M. Parvel, "Thermal Stress Analysis of orthotropic graded Rotating Disks," *Int. J. Mod. Eng. Res.*, vol. 2, no. 5, pp. 3881–3885, 2012.
- [48] ASTM, "ASTM D638 – 14. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics," *Annu. B. ASTM Stand.*, pp. 1–20, 2014.
- [49] C. H. O. Chen, C. C. Teng, S. F. Su, W. C. Wu, and C. H. Yang, "Effects of microscale calcium carbonate and nanoscale calcium carbonate on the fusion, thermal, and mechanical characterizations of rigid poly(vinyl chloride)/calcium carbonate composites," *J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys.*, vol. 44, no. 2, pp. 451–460, Jan. 2006.
- [50] M. Jabbari, S. Sohrabpour, and M. R. Eslami, "Mechanical and thermal stresses in a functionally graded hollow cylinder due to radially symmetric loads," *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 79, no. 7, pp. 493–497, Jul. 2002.
- [51] A. C. Ugural and S. K. Fenster, *Advanced mechanics of materials and applied elasticity*. Prentice Hall, 2012.
- [52] Y. A. Çengel, *Heat and mass transfer : a practical approach*. Tata McGraw-Hill, 2007.
- [53] R. J. Crowson and R. G. C. Arridge, "Linear viscoelastic properties of epoxy resin polymers in dilatation and shear in the glass transition region. 1. Time-temperature superposition of creep data," *Polymer (Guildf)*, vol. 20, no. 6, pp. 737–746, Jun. 1979.
- [54] N. E. Dowling, K. Siva Prasad, and R. Narayanasamy, *Mechanical behavior of*

*materials : engineering methods for deformation, fracture, and fatigue.* Pearson, 2013.

[55] G. C. Segeler, *Gas Engineers Handbook*. Industrial Press, 1966.

[56] ASME. B31.8, "Gas Transmission and Distribution Piping Systems," American Society of Mechanical Engineers, New York, vol. 552, no. 1, USA, 2003.

## ANEXOS

### ALGORITMO PARA LA SOLUCIÓN DEL MODELO PROPUESTO # 1

#### %DEFINICIÓN DE PARÁMETROS GEOMETRICOS

```
deltar1 =0.0001; %espaciamento radial cilindro 1 - ADIMENSIONAL"
deltar2=0.0001; %espaciamento radial cilindro 2 - ADIMENSIONAL"
deltar3=0.0001; %espaciamento radial cilindro 3" ADIMENSIONAL
R1=0.1313; %RADIO INTERNO TUBERÍA DE GAS% (M)
R2=0.1365; %RADIO EXTERNO TUBERÍA DE GAS% (M)
R3=0.1492; %RADIO EXTERNO RESINA% (M)
R4=0.1555; %RADIO EXTERNO CAMISA% (M)
L=1; %LONGITUD TUBERIA% (M)
AREA1=pi*2*R1*L; %AREA CONVECCIÓN INTERNA% (M2)
AREA2=pi*2*R4*L; %AREA CONVECCIÓN EXTERNA% (M2)
r1=(R1:deltar1:R2)'; %vector radio cilindro1% (M)
r2=(R2:deltar2:R3)'; %vector radio cilindro2% (M)
r3=(R3:deltar2:R4)'; %vector radio cilindro3% (M)
Nodos=length(r2); %ADIMENSIONAL
Nodosr1=length(r1); %ADIMENSIONAL
Nodosr3=length(r3); %ADIMENSIONAL
```

#### %PARAMETROS TRANSFERENCIA DE CALOR

```
H1= 45; %COEFICIENTE CONVECCIÓN INTERNA TUBERÍA W/M2/K%
H2= 20; %COEFICIENTE CONVECCIÓN EXTERNA DEL SISTEMA DE REHAB% W/M2/K
alpha=5.5e-6; %COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA DE LA RESINA%
K1=50; %COEFICIENTE CONDUCTIVIDAD TUBERÍA DE GAS$
K2=1; %COEFICIENTE CONDUCTIVIDAD RESINA%
K3=50; %COEFICIENTE CONDUCTIVIDAD CAMISA%
RES1=(1/H1*AREA1); %log(R2/R1)/(2*pi*L*K1); %RESISTENCIA ANTES DE LA
RESINA%
RES2=log(R2/R1)/(2*pi*L*K1); %RESISTENCIA INCLUYENDO LA RESINA%
RES3=log(R3/R2)/(2*pi*L*K2);
RES4=log(R4/R3)/(2*pi*L*K3);
RES5=1/(H2*AREA2);
RESTOTAL=(1/H1*AREA1)+log(R2/R1)/(2*pi*L*K1)+log(R3/R2)/(2*pi*L*K2)+log(R
4/R3)/(2*pi*L*K3)+1/(H2*AREA2);
CALOR=(T1-TE)/RESTOTAL; %CALOR%
T2=T1-CALOR*RES1;
```



```

T3=T1-CALOR*(RES1+RES2);
T4=T1-CALOR*(RES1+RES2+RES3);
T5=T1-CALOR*(RES1+RES2+RES3+RES4);
Tcil1=(log(r1/R1)*(T3-T2)/log(R2/R1)+T2);
Tcil2=(log(r2/R2)*(T4-T3)/log(R3/R2)+T3);
Tcil3=(log(r3/R3)*(T5-T4)/log(R4/R3)+T4);

%PARAMETROS DE ELASTICIDAD
nu=0.3; %poisson%
%RESINA LOCTITE

% a0=1.879e9;
% a1=-9.294e8;
% a2=7.57e8;
% b1=-2.506e9;
% b2=-2.779e8;
% w=0.09702;
%
E=a0+a1*cos(Tcil2*w)+b1*sin(Tcil2*w)+a2*cos(2*Tcil2*w)+b2*sin(2*Tcil2*w);
%MODULO DE ELASTICIDAD DE LA RESINA LOCTITE DEPENDIENTE DE LA
TEMPERATURA%

% %RESINA SIKADUR 301
% a=-0.0322;
% b= 0.07742;
% c=4.943e8;
% d=0.006067;
% E=a*exp(b*Tcil2)+c*exp(d*Tcil2); %MODULO DE ELASTICIDAD DE LA RESINA
SIKADUR 301 DEPENDIENTE DE LA TEMPERATURA%

% % RESINA SIKADUR 32
a=1.281E34;
b=-0.1906;
E=a*exp(b*Tcil2); %MODULO DE ELASTICIDAD DE LA RESINA LOCTITE DEPENDIENTE
DE LA TEMPERATURA%

E2=mean(E); % MÓDULO DE ELASTICIDAD PROMEDIO DE LA RESINA
E1=206000000000; %MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL TUBO DE GAS
E3=206000000000; %MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LA CAMISA DE ACERO%

%CONDICIONES DE FRONTERA

P0=P0*1000000 %PRESIÓN INTERNA DE LA TUBERÍA%
Q=0; %PRESIÓN EXTERNA DE LA TUBERÍA

%SISTEMA MATRICIAL DE ECUACIONES DE LAMÉ PARA CÁLCULO DE PRESIONES
INTERMEDIAS

beta1=((1-nu)*R2^3)/(E2*(R3^2-R2^2))+((1+nu)*(R2^2*R3^2))/(E2*(R3^2-
R2^2)*R2)+((1-nu)*R2^3)/(E1*(R2^2-R1^2))+((1+nu)*R1^2*R2^2)/(E1*(R2^2-
R1^2)*R2);

```

```

beta2=-(((1-nu)*R3^2*R2)/(E2*(R3^2-R2^2))+((1+nu)*(R2^2*R3^2)/(E2*(R3^2-
R2^2)*R2)));
beta3=-(((1-nu)*R2^2*R3)/(E2*(R3^2-R2^2))+((1+nu)*R2^2*R3^2)/(E2*(R3^2-
R2^2)*R3)));
beta4=(1-nu)*R3^3/(E3*(R4^2-R3^2))+((1+nu)*R3^2*R4^2/(E3*(R4^2-
R3^2)*R3))+((1-nu)*R3^3/(E2*(R3^2-R2^2))+((1+nu)*R2^2*R3^2/(E2*(R3^2-
R2^2)*R3)));
teta1=P0*((1-nu)*(R1^2*R2)/(E1*(R2^2-R1^2))+((1+nu)*(R1^2*R2^2)/(E1*(R2^2-
R1^2)*R2)));
teta2=Q*((1-nu)*R4^2*R3/(E3*(R4^2-R3^2))+((1+nu)*R3^2*R4^2/(E3*(R4^2-
R3^2)*R3)));

```

```

A=[1/R1^2 0 0 2 0 0 0 0;
    1/R2^2 0 0 2 0 0 1 0;
    0 1/R2^2 0 0 2 0 1 0;
    0 1/R3^2 0 0 2 0 0 1;
    0 0 1/R3^2 0 0 2 0 1;
    0 0 1/R4^2 0 0 2 0 0;
    0 0 0 0 0 0 beta1 beta2;
    0 0 0 0 0 0 beta3 beta4]; %MATRIZ DE COEFICIENTES
CTE=[-P0 0 0 0 0 Q teta1 teta2]'; % VECTOR DE CONSTANTES
VAR=inv(A)*CTE % VECTOR DE VARIABLES CALCULADAS
A1=VAR(1,1);
A2=VAR(2,1);
A3=VAR(3,1);
C1=VAR(4,1);
C2=VAR(5,1);
C3=VAR(6,1) ; %CONSTANTES DE LAMÉ
P1=VAR(7,1) ; %PRESIÓN INTERMEDIA ENTRE CILINDRO 1 Y CILINDRO 2
P2=VAR(8,1) ; %PRESIÓN INTERMEDIA ENTRE CILINDRO 2 Y CILINDRO 3

```

```

%PRESIÓN EXTERNA (Pa)
%N2=E2/E1;
%N3=E3/E2;
%gamma1=R2/R1;
%gamma2=R3/R2;
%gamma3=R4/R3;
%DE = (A1*w*(T1-T3)*sin(w*((T3-
T1)*log(r2/R2)/log(R3/R2))+T2))./(r2*log(R3/R2))+ (B1*w*(T3-
T1)*cos(w*((T3-T1)*log(r2/R2)/log(R3/R2))+T2))./(r2*log(R3/R2))+
(2*A2*w*(T1-T3)*sin(2*w*((T3-
T1)*log(r2/R2)/log(R3/R2))+T2))./(r2*log(R3/R2)) + (2*B2*w*(T3-
T1)*cos(2*w*((T3-T1)*log(r2/R2)/log(R3/R2))+T2))./(r2*log(R3/R2))
%DE=diff(E)./diff(r2);

```

```

% DERIVADA DE MODULO DE ELASTICIDAD RESPECTO AL RADIO
deltar2=0.0001;
PrimDer_Ei=zeros(Nodos,1);
PrimDer_Ei_1=-1/2*ones(Nodos-1,1);
PrimDer_Ei_2=1/2*ones(Nodos-1,1);
PrimDerE=(diag(PrimDer_Ei)+diag(PrimDer_Ei_1,-
1)+diag(PrimDer_Ei_2,1))*1/deltar2;
PrimDerE(1,1)=-1/deltar2;
PrimDerE(1,2)=1/deltar2;
PrimDerE(end,end)=1/deltar2;
PrimDerE(end,end-1)=-1/deltar2;

```

```

DE=PrimDerE*E;

%desp1=1-0.5*(1+(nu/(1-nu)))*(1-N2)+0.5*(1+(nu/(1-nu)))*(1-N2)*gamma2^2-
0.5*(1-(nu/(1-nu)))*(1-N2)*gamma1^2-0.5*((1+(nu/(1-nu)))+(1-(nu/(1-
nu)))*N2)*gamma1^2*gamma2^2;
%delta1=desp1/((gamma1^2-1)*gamma2^2);
%peta1=(gamma2^2-1)*N2/((gamma1^2-1)*gamma2^2);
%desp2=1-0.5*(1+(nu/(1-nu)))*(1-N3)+0.5*(1+(nu/(1-nu)))*(1-N3)*gamma3^2-
0.5*(1-(nu/(1-nu)))*(1-N3)*gamma2^2-0.5*(1+(nu/(1-nu)))+(1-(nu/(1-
nu)))*N3)*gamma2^2*gamma3^2;
%peta2=-(desp2*peta1)/((gamma2^2-1)*gamma3^2);
%delta2=(desp2*delta1)/((gamma2^2-1)*gamma3^2)+(gamma3^2-
1)*N3/((gamma2^2-1)*gamma3^2);
%q1=-(Q+peta2*presion)/delta2;
%q2=delta1*((Q+peta2*presion)/delta2)-peta1*presion;
%C1=-(presion-gamma1^2*q1)/(2*(1-gamma1^2));
%A1=R1^2*(presion-q1)/(1-gamma1^2);
%A2=R2^2*(q1-q2)/(1-gamma2^2);
%C2=-(q1-gamma2^2*q2)/(2*(1-gamma2^2));
%C3=0.25*(1+nu/(1-nu))*(1-N3)*A2/R2^2+0.5*((1+nu/(1-nu)))+(1-nu/(1-
nu))*N3)*C2;
%A3=(1-0.5*(1+nu/(1-nu))*(1-N3))*A2+(1-nu/(1-nu))*(1-N3)*C2*R2^2;
%u1=((1-nu^2)/E1)*(-(1+(nu/(1-nu)))*A1./r1+2*(1-(nu/(1-nu)))*C1.*r1));
%u3=((1-nu^2)/E3)*(-(1+(nu/(1-nu)))*A3./r3+2*(1-(nu/(1-nu)))*C3.*r3));

%COEFICIENTES DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL DEL DESPLAZAMIENTO EN CILINDRO 2
SECONDCOEFF=(1./r2+(1./E).*DE);
THIRDCOEFF=((1./E).*DE)*nu./r2-1./r2.^2;
DT=(T3-T1)./r2*log(R3/R2);
INDEPCOEFF=(1+nu)*alpha.*((1./E).*DE).*(Tcil2-T1)+DT);

% MATRIZ DE COEFICIENTES DE LA SEGUNDA DERIVADA DIFERENCIAS CENTRADAS

SegDer_ui=-2*ones(Nodos,1);
SegDer_ui_1=ones(Nodos-1,1);
SegDer_ui_2=ones(Nodos-1,1);
SegDer=(diag(SegDer_ui)+diag(SegDer_ui_1,-
1)+diag(SegDer_ui_2,1))*1/deltar2^2;

%MATRIZ DE COEFICIENTES DE PRIMERA DERIVADA DIFERENCIAS CENTRADAS

PrimDer_ui=zeros(Nodos,1);
PrimDer_ui_1=-1/2*ones(Nodos-1,1);
PrimDer_ui_2=1/2*ones(Nodos-1,1);
PrimDer=(diag(PrimDer_ui)+diag(PrimDer_ui_1,-
1)+diag(PrimDer_ui_2,1))*1/deltar2;

%LADO IZQUIERDO DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL

LHS=SegDer+repmat(SECONDCOEFF,[1 Nodos]).*PrimDer+repmat(THIRDCOEFF,[1
Nodos]).*eye(Nodos);
LHS(1,:)=0;
LHS(1,1)=1;
LHS(end,:)=0;

```

```
LHS(end,end)=1;
```

```
%DESPLAZAMIENTOS RADIALES SEGÚN TEORÍA DE LAMÉ
```

```
u1=(1-nu)*(R1^2*P0-R2^2*P1).*r1/(E1*(R2^2-R1^2))+(1+nu)*(P0-  
P1)*R1^2*R2^2./(E1*(R2^2-R1^2)*r1);  
u2=(1-nu)*(R2^2*P1-R3^2*P2).*r2/(E2*(R3^2-R2^2))+(1+nu)*(P1-  
P2)*R2^2*R3^2./(E2*(R3^2-R2^2)*r2);  
u3=(1-nu)*(R3^2*P2-R4^2*Q).*r3/(E3*(R4^2-R3^2))+(1+nu)*(P2-  
Q)*R3^2*R4^2./(E3*(R4^2-R3^2)*r3);
```

```
%LADO DERECHO DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL
```

```
RHS=INDEPCOEFF;  
RHS(1)=u1(end);% Ojo aca con la frontera  
RHS(end)=u3(1);
```

```
%CALCULO DE DESPLAZAMIENTO RADIAL U2 CON ECUACIÓN DIFERENCIAL
```

```
U2=LHS\RHS;
```

```
%AJUSTE DE CONDICIONES DE FRONTERA EN MATRIZ DE COEF PRIMERA DERIVADA
```

```
PrimDer(1,1)=-1/deltar2;  
PrimDer(1,2)=1/deltar2;  
PrimDer(end,end)=1/deltar2;  
PrimDer(end,end-1)=-1/deltar2;
```

```
Nodosr2=Nodos;  
Nodosr1=Nodosr1-1;  
Nodosr3=Nodosr3-1;  
NodosTotales=Nodosr1+Nodosr2+Nodosr3;  
PrimDer_ui=zeros(NodosTotales,1);  
PrimDer_ui_1=-1/2*ones(NodosTotales-1,1);  
PrimDer_ui_2=1/2*ones(NodosTotales-1,1);  
deltarTotal=[ones(Nodosr1,1)*deltar1;ones(Nodosr2,1)*deltar2;ones(Nodosr3,  
1)*deltar3];  
PrimDerRTotal=(diag(PrimDer_ui)+diag(PrimDer_ui_1,-  
1)+diag(PrimDer_ui_2,1))./repmat(deltarTotal,[1 NodosTotales]);  
PrimDerRTotal(1,1)=-1/deltarTotal(1);  
PrimDerRTotal(1,2)=1/deltarTotal(1);  
PrimDerRTotal(end,end)=1/deltarTotal(end);  
PrimDerRTotal(end,end-1)=-1/deltarTotal(end);  
Etotal=[ones(Nodosr1,1)*E1;ones(Nodosr2,1)*E2;ones(Nodosr3,1)*E3];  
uTotal=[u1(1:end-1);u2;u3(2:end)];  
rTotal=[r1(1:end-1);r2;r3(2:end)];  
dudrTotal=PrimDerRTotal*uTotal;
```

```
%ESFUERZOS RADIALES
```

```
%esfuerzos radiales calculados con la teoría de lamé
```

```

esfradcil1=(R1^2*P0-R2^2*P1)/(R2^2-R1^2)-((P0-P1)*R1^2*R2^2)./(R2^2-
R1^2)*r1.^2);
esfradcil2=(R2^2*P1-R3^2*P2)/(R3^2-R2^2)-((P1-P2)*R2^2*R3^2)./(R3^2-
R2^2)*r2.^2);
esfradcil3=(R3^2*P2-R4^2*Q)/(R4^2-R3^2)-((P2-Q)*R3^2*R4^2)./(R4^2-
R3^2)*r3.^2);
esfuerzoradialTotal= Etotal/(1-nu^2).*(dudrTotal+nu*uTotal./rTotal);

%ESFUERZO RADIAL CALCULADO CON ECUACIÓN DIFERENCIAL
esfradnumcil2= E.*(PrimDer*U2+nu*U2./r2-(1+nu)*alpha*(Tcil2-T1))/(1-
nu^2);

%ESFUERZOS TANGENCIALES

%esfuerzos tangenciales calculados con la teoría de lamé
esftancil1=(R1^2*P0-R2^2*P1)/(R2^2-R1^2)+((P0-P1)*R1^2*R2^2)./(R2^2-
R1^2)*r1.^2);
esftancil2=(R2^2*P1-R3^2*P2)/(R3^2-R2^2)+((P1-P2)*R2^2*R3^2)./(R3^2-
R2^2)*r2.^2);
esftancil3=(R3^2*P2-R4^2*Q)/(R4^2-R3^2)+((P2-Q)*R3^2*R4^2)./(R4^2-
R3^2)*r3.^2);
esfuerzotangencialtotal=Ettotal/(1-nu^2).*(uTotal./rTotal+nu*dudrTotal);

%ESFUERZO TANGENCIAL EN CILINDRO 2 CALCULADO CON ECUACIÓN DIFERENCIAL

esftannumcil2 = (E/(1-nu^2)).*(U2./r2)+nu*PrimDer*U2-
(1+nu)*alpha*(Tcil2-T1));
%plot(r1,esfradcil1)

%ESFUERZO RADIAL Y TANGENCIAL EN CILINDRO 1 SIN SISTEMA DE REHABILITACIÓN

esfradcil1SC=(R1^2*P0)/(R2^2-R1^2)-((P0)*R1^2*R2^2)./(R2^2-R1^2)*r1.^2)
esftancil1SC=(R1^2*P0)/(R2^2-R1^2)+((P0)*R1^2*R2^2)./(R2^2-R1^2)*r1.^2);

esfaxialcil2=esftannumcil2./2;
esfaxialcil1=esftancil1./2;

vonmisescil2=((esftannumcil2-esfradnumcil2).^2+(esfradnumcil2-
esfaxialcil2).^2+(esfaxialcil2-esftannumcil2).^2/2).^0.5;
vonmisescil1=((esftancil1-esfradcil1).^2+(esfradcil1-
esfaxialcil1).^2+(esfaxialcil1-esftancil1).^2/2).^0.5;

vonmisescil1=vonmisescil1/1000000

%GRAFICOS
figure(1)
subplot(2,1,1)
% plot(r1,esfuerzoradial1,'*-r',r2,esfuerzoradial2,r3,esfuerzoradial3,...
%      r1,esfradcil1,'o-b',r2,esfradcil2,r3,esfradcil3,...
plot(rTotal,esfuerzoradialTotal,r2,esfradnumcil2)
legend('esfrad','esfradnumcil2')
subplot(2,1,2)
plot(rTotal,esfuerzotangencialtotal,r2,esftancil2)

```

```

legend('esftan','esftannumcil2')
figure(2)
subplot(2,1,1)
plot(r2,esftannumcil2,'g',r2,esftancil2,'b')
legend('esftannumcil2','esftancil2')
subplot(2,1,2)
plot(r2,esfradcil2,'b',r2,esfradnumcil2,'g')
legend('esfradcil2','esfradnumcil2')

figure(3)
plot(r2,U2,'k',r2,u2,'g')
legend('ecdifff','lamé')
figure(4)
plot(r1,u1,'g',r2,u2,'g',r3,u3,'g',r2,U2,'k')
legend('u1','u2','u3','U2')

figure(5)
subplot(2,1,1)
plot(r1,esfradcil1SC,'b',r1,esfradcil1,'g')
legend('esfradcil1SC','esfradcil1')

subplot(2,1,2)
plot(r1,esftancil1SC,'b',r1,esftancil1,'g')
legend('esftancil1SC','esftancil1')

figure(6)
plot(r2,vonmises cil2,'r',r2,esftannumcil2,'g',r2,esfradnumcil2,'k')
legend('vonmises cil2','esftannumcil2','esfradnumcil2')

figure(7)
plot(r2,E)
title('Modulo de Young Vs radio resina sikadur 32')
xlabel('Radio(m)')
ylabel('Modulo de Young(Pa)')

figure(8)
plot(r1,Tcil1,r2,Tcil2,r3,Tcil3)
title('Temperatura Vs Radio')
xlabel('Radio(m)')
ylabel('Temperatura(K)')

```